

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY

Maciej Jerzy Kobielski

OPTIMALIZACJA UKŁADÓW REGULACJI PRZEPŁYWU
FILTRACYJNEGO W ZBIORNIKACH ŻYWIC WYMIANY
JONOWEJ

Rozprawa doktorska
napisana pod kierunkiem
promotora dra hab. inż. Wojciecha Skarki prof. PŚ,
opiekuna przemysłowego dra inż. Damiana Kądziaławy

Gliwice, 2024

Spis treści

1	Wstęp.....	5
2	Tezy i cel pracy.....	8
2.1	Cel pracy.....	8
2.2	Teza	8
3	Stan techniki	9
3.1	Proces przemysłowy projektowania urządzeń gospodarstwa domowego na przykładzie zmywarki domowej.....	9
3.1.1	Pierwsze zmywarki przemysłowe.....	9
3.1.2	Funkcjonalności układu zmywarki.....	10
3.1.3	Regulacje energetyczne – EU Energy Label.....	14
3.1.4	Proces projektowania kompletnego układu – rola prac zleconych	16
3.1.5	Metodyka CBD (<i>cost break-down</i>).....	19
3.1.6	Podzespoły	21
3.1.7	Technologie wytwarzania i ich ograniczenia – procesy specjalne.....	23
3.1.8	Metody badawcze i rozwojowe w ujęciu wytwarzania produktu	28
3.1.9	FTO (<i>Freedom-to -operate</i>) – perspektywa praw własności intelektualnej	30
3.2	Wymiana jonowa.....	33
3.2.1	Twardość wody w ujęciu koła Sinnera	34
3.2.2	Twardość wody – wpływ na żywotność urządzeń.....	35
3.2.3	Jonity i chemia wymiany jonów	35
3.2.4	Alternatywne metody wymiany jonowej oraz ich zasada działania	36
3.2.5	Przykładowe warunki pracy jonitów w urządzeniach AGD.....	37
3.2.6	Perspektywa kosztowa wykorzystania jonitów w ujęciu przemysłowym	38
3.3	Mechanika płynów	39
3.3.1	Opis matematycznych modeli fizycznych zjawisk zachodzących w urządzeniu na przykładzie zmiękczacza.....	39
3.3.2	Reżimy przepływu	39
3.3.3	Matematyczny opis przepływu	41
3.3.4	Turbulencje	42
3.3.5	Kawitacja.....	43
3.3.6	Przepływy w ciałach porowatych – przepływy filtracyjne na przykładzie opisów stosowanych w przemyśle naftowym	44
3.4	Modelowanie numeryczne CFD (<i>computational flow dynamics</i>)	45
3.4.1	Podział modeli numerycznych CFD	47

3.4.2	Perspektywa przemysłowa – wykorzystanie CFD w perspektywie Computer Assisted Design (CAD)	48
4	Metodyka.....	49
4.1	Opis badanego rozwiązania technologicznego w ujęciu IPR.....	49
4.2	Opis problemu badawczego	49
4.3	Opis warunków brzegowych dla badania	49
4.3.1	Ograniczenia technologiczne wytwarzania	49
4.3.2	Ograniczenia kosztowe surowca	49
4.3.3	Przyjęte założenia korelacji	49
4.4	Plan badania	51
4.4.1	Mapa badawcza, za IPB.....	51
4.4.2	Opisowy plan badania	52
4.5	Wstępne badanie symulacyjne CFD	53
4.5.1	Opis przyjętego modelu konstrukcji.....	53
4.5.2	Opis metodyki badania wstępnego	54
4.5.3	Opis przyjętych warunków brzegowych symulacji	55
4.5.4	Omówienie wyników wstępnego badania symulacyjnego – opis zaobserwowanego wpływu metodyki dławienia na pola skalarne ciśnienia i wektorowe prędkości w filtrze	56
4.6	Badanie porównawcze preparatów jonitowych do zastosowania w badanym rozwiązaniu konstrukcyjnym.....	57
4.6.1	Opis przyjętej metodyki analizy zachowania preparatów jonitowych.....	57
4.6.2	Opis przygotowania próbek badawczych	59
4.6.3	Omówienie wyników badania porównawczego jonitów	59
4.6.4	Analiza statystyczna korelacji zachowania hydraulicznego badania porównawczego jonitów	60
4.7	Badanie empiryczne i symulacyjne CFD rozwiązania konstrukcyjnego.....	61
4.7.1	Opis dobranego modelu symulacyjnego oraz warunków strojenia.....	61
4.7.2	Opis konstrukcyjny urządzenia badawczego strojenia filtra.....	63
4.7.3	Opis wykonania urządzenia badawczego strojenia filtra.....	64
4.7.4	Opis konstrukcyjny urządzenia badawczego geometrii docelowej	66
4.7.5	Opis wykonania urządzenia badawczego o geometrii zbliżonej do produkcyjnej	68
4.7.6	Opis konstrukcji i logiki działania stacji badawczej.....	71
4.7.7	Opis wykonania stacji badawczej	71
4.8	Omówienie wyników badania empirycznego dla strojenia modelu numerycznego CFD	74
4.9	Opis badania CFD strojonego modelu symulacyjnego Ansys Fluent.....	75
4.9.1	Strojenie modelu przepływu w ciele porowatym.....	75
4.9.2	Analiza niezależności siatki modelu docelowego	80

4.9.3	Analiza korelacji wyników symulacyjnych wariantów modelu docelowego z badaniem empirycznym	82
4.9.4	Metodyka pozyskania wyników rozkładu statystycznego prędkości w objętości złoża	88
4.10	Ocena wyników symulacyjnych i analiza statystyczna wyników symulacji optymalizacyjnej CFD strojonego modelu	97
5	Dyskusja	103
6	Wnioski	111
7	Bibliografia.....	112
8	Spis ilustracji	118
9	Spis tabel.....	122

1 Wstęp

Dostępność wody od zarania dziejów stanowiła warunek konieczny dla zaistnienia ludzkich siedlisk. Historyczne osady czy pierwsze miasta każdorazowo skupiały się wokół rzek lub jezior właśnie z uwagi na istotną rolę wody nie tylko w perspektywie biologii, ale także antropologii. Funkcjonowanie ludzi i wszelkich towarzyszących im procesów każdorazowo wymagało dostępności wody – od czasów rewolucji agrarnej niezmiennie wykorzystywanej dla procesów przygotowania pożywienia, nawodnienia upraw, procesów związanych z utrzymaniem higieny. Różnorodność przeznaczenia wody w procesach powiązanych z higieną na przestrzeni lat zmieniała się, a wymagania i oczekiwania stawiane względem jakości samego surowca stopniowo zaczynały odgrywać coraz większą rolę.

W perspektywie wykorzystania wody jako medium procesów myjących we współczesnych urządzeniach gospodarstwa domowego, kluczowym parametrem jest ilość rozpuszczonych w wodzie jonów wapniowych i magnezowych, zwanym potocznie twardością wody. Wysoka twardość wody, pierwotnie opisywana jako niska zdolność wody do spieniania mydła istotnie utrudnia penetrację zabrudzeń i odrywanie konglomeratów cząsteczek zabrudzeń o charakterze niepolarnym, czy nierozpuszczalnym w wodzie.

Optymalnym dla efektywności zmywania, efektywności energetycznej oraz cyklu życia urządzeń gospodarstwa domowego będzie stan możliwie niskiej twardości wody, co zapewniane jest konstrukcyjnie we współczesnych urządzeniach przez zastosowanie wymienników jonowych. Wymienniki jonowe najczęściej spotykane są w formie zbiorników filtracyjnych wypełnionych granulatem żywicy jonowymiennych, skutecznie wychwytyjącym rozpuszczone w wodzie jony wapnia i magnezu. Negatywny wpływ jonów wapniowych i magnezowych rozpuszczonych w wodzie na układy hydrauliczne i termiczne urządzeń skutkuje również argumentem żywotności urządzeń – stosowanie systemów zmiękczenia wody pozwala na pomniejszenie tempa przyrostu kamienia kotłowego na elementach grzejnych a tym samym poprawę wymiany ciepłej pomiędzy wodą a grzałką skutkując zmniejszeniem wpływu przegrzewania spirali grzejnej na zużycie urządzenia.

Z uwagi na fakt, że przemysł produkcyjny współczesnych urządzeń gospodarstwa domowego wymaga ogromnych inwestycji w linie produkcyjne urządzeń docelowych oraz wielu elementów składowych urządzeń, bardzo istotnym czynnikiem opłacalności ekonomicznej przedsięwzięcia jest efekt skali. Całościowy produkcji pojedynczych elementów składowych maszyn cechuje się wysoką wrażliwością opłacalności na niewielkie fluktuacje jednostkowego kosztu materiału. Tym samym, w perspektywie wielkoseryjnej produkcji przemysłowej zmiękczaczy dla zmywarek domowych, zapewnienie możliwie wysokiej pojemności jonowej wymiennika jonowego, a tym samym efektywności konstrukcyjnej, pozwala na zapewnienie konkurencyjności rynkowej produktu. Taka efektywność wpływa jednocześnie korzystnie na obniżenie śladu węglowego produkcji przez zmniejszenie ilości potrzebnego dla zapewnienia funkcji surowca.

Jako odpowiedź na zapotrzebowanie optymalizacji wykorzystania surowca żywicy jonowymiennej powstało rozwiązanie konstrukcyjne, zgłoszone do ochrony patentowej pod numerem PCT/CN2020/083801, pozwalające na wykorzystanie zbiornika żywicy o cylindrycznym kształcie oraz pierścieniowym wlocie strumienia zlokalizowanym u dołu cylindra oraz odpływie o rozproszonej geometrii – podstawie górnej cylindra oraz koncentrycznym względem cylindra kanału centralnego o wlocie zlokalizowanym u dołu cylindra. Konstrukcja wykorzystuje zjawisko obniżenia ciśnienia w dolnym, centralnym obszarze zbiornika przez udostępnienie kanału o niższym oporze przepływu niż ścieżka przez

granulat jonitowy, dla modyfikacji pola ciśnienia a tym samym pola wektorowego prędkości przepływu w filtrze jonitowym dla zwiększenia udziału wymiany jonowej centralnej dolnej części.

Problemem płynącym z tak zdefiniowanego rozwiązania konstrukcyjnego jest znalezienie metody doboru optymalnego wymiaru kanału w taki sposób, aby opór przepływu przez kanał upustu pozwalał na możliwie wysoką homogenizację prędkości przepływu w ramach objętości żywicy jonowymiennej. Stan wiedzy, z uwagi na nowość rozważanego autorskiego rozwiązania, nie dostarcza gotowej metodologii dla doboru wymiarów konstrukcyjnych w funkcji warunków brzegowych oraz w celu maksymalizacji parametru homogeniczności przepływu wewnątrz granulatu.

Tematem niniejszej rozprawy jest optymalizacja konstrukcji zbiornika wymiany jonowej przeznaczonego do użycia w zmywarkach gospodarstwa domowego w funkcji wykorzystania potencjału chemicznego pojemności jonowej wykorzystanej w urządzeniu żywicy jonowymiennej, dla minimalizacji kosztu produkcji wyrobu.

Opracowanie metody dla projektowania takiego kanału jest trudnym problemem interdyscyplinarnym, zawierającym zagadnienia z obszaru inżynierii mechanicznej, inżynierii chemicznej, praktyki przemysłu produkcyjnego oraz nauk komputerowych – plan badań musiał tym samym odzwierciedlać szeroki zakres badań zarówno w badaniu literaturowym jak i w badaniach empirycznych wszystkich etapów planu badawczego.

W pierwszej części rozprawy, w ramach badania stanu wiedzy, w pierwszej kolejności opisany został przemysłowy proces projektowania urządzeń gospodarstwa domowego na przykładzie zmywarek.

W ramach opisu bazującego na stanie wiedzy, stanie techniki oraz doświadczeniu zawodowym autora niniejszej rozprawy przybliżone zostały konstrukcje urządzeń automatycznego zmywania naczyń w ujęciu historycznym, zakres i funkcjonalności elementów składowych systemów zmywarek oraz ograniczenia i wytyczne wynikające z krajobrazu prawnego Unii Europejskiej dla urządzeń gospodarstwa domowego. W następnej kolejności przytoczony został aspekt finansowy inwestycji w badania, rozwój i koszt industrializacji dla każdego nowego urządzenia – na rzeczywistych przykładach przemysłowych opisany został w ujęciu kosztu i ryzyka inwestora proces projektowania urządzenia oraz rola współczesnej metodyki wyceny produktów seryjnych w strategiach dla osiągnięcia konkurencyjności produktów. Pokazana została perspektywa różnorodności typów i funkcji podzespołów wykorzystywanych w zmywarkach domowych oraz przybliżone zostały wykorzystywane technologie wytwarzania wraz z ich wpływem na efektywność kosztową podzespołu. Ostatecznie opisany został proces opracowania konstrukcji przeznaczonej do produkcji przemysłowej wraz z prawnymi aspektami ograniczeń wynikających z prawa własności intelektualnej i prawa własności przemysłowej.

Następnie w ramach opisu stanu wiedzy zgłębiona została perspektywa inżynierii chemicznej dla wykorzystywanej w konstrukcji metody wymiany jonowej. Zaczynając od krótkiej historii zrozumienia skuteczności procesów mycia i czyszczenia, opisano wpływ twardości wody na żywotność urządzeń. Przybliżono strukturę chemiczną oraz zasadę działania rozważanego surowca oraz przedstawiono alternatywy technologiczne dla wykorzystania surowca żywic jonowymiennych, również w perspektywie kosztu.

W następnej kolejności opisano stan wiedzy dla potrzebnego w wykonanej serii badań zakresu mechaniki płynów – opisano zakres zjawisk zachodzących w urządzeniu podlegających opisowi matematycznemu lub numerycznemu oraz zasadność jego stosowania w funkcji rozważanego przypadku.

Z analitycznej mechaniki płynów opis stanu wiedzy przechodzi ostatecznie do wykorzystanego w pracy modelowania numerycznego – opisany został podział numerycznych metod wraz z ich wadami i zaletami.

Opisano skalę wykorzystania metod symulacji numerycznych w przekroju przemysłu inżynierskiego oraz przybliżono dostępne komercyjnie rozwiązania w postaci pakietów oprogramowania symulacyjnego, uzasadniając wybór pakietów wykorzystanych w ramach niniejszej rozprawy.

Zakres opisanego stanu wiedzy odpowiada zakresowi wiedzy wymaganemu dla zaplanowanego, wykonanego i opisanego w ramach kolejnych rozdziałów zakresu badań.

W następnym rozdziale opisana została metodyka badania.

Wychodząc od zdefiniowanego problemu badawczego, którym jest brak dostępnej efektywnej metody optymalizacji konstrukcji dla opisanego szczególnego rozważanego przypadku konstrukcyjnego, opisano wynikające ze stanu techniki i wiedzy warunki brzegowe badania, zawierające ograniczenia technologiczne, ograniczenia kosztowe oraz przyjęte założenia.

W oparciu o szczegółową mapę badawczą pokazany został szczegółowy zakres etapów prowadzonego badania oraz ich współzależności.

Opis badania zaczyna się od badania wstępnego zasadności stosowania rozwiązania konstrukcyjnego opisanego w pracy, pozwalającego stwierdzić w wyniku uproszczonych badań symulacyjnych zdatność metody konstrukcyjnej dla sterowania poziomem homogenizacji przepływu.

W następnej kolejności plan badawczy przechodzi do badań wydajności preparatów, stanowiących podstawę do przyjęcia określonych w dalszej części pracy kryteriów korelacji oraz kryteriów optymalizacji. Zakres badań chemicznych zakończony jest analizą statystyczną wyników.

Od badań wydajności preparatów plan badawczy przechodzi do opracowania metodyki dla badań empirycznych i symulacyjnych konstrukcji, wraz z metodyką strojenia modelu numerycznego zastosowanego w badaniu – z uwagi na złożoność zachowania modelu empirycznego zastosowane zostało podejście wykorzystujące dwa badania empiryczne dla strojenia modelu symulacyjnego przeznaczonego do właściwego badania optymalizacyjnego.

Opis metodyki strojenia zawiera szczegółowy opis statystyki wyników oraz zakres narzędzi statystycznych wykorzystanych do interpretacji wyników badań oraz korelacji.

Szczegółowo opisane zostały zarówno dwa badania empiryczne strojenia, metodyka wykonania prototypów, stacji badawczych oraz logiki akwizycji danych, jak i sam proces strojenia modelu symulacyjnego w oprogramowaniu Ansys Fluent w oparciu o pozyskane dane.

W ostatnim właściwym kroku badania symulacyjnego w oparciu o potwierdzone statystycznie strojenie modelu symulacyjnego opisana została seria symulacji numerycznych w funkcji zmiany geometrii oraz warunków brzegowych przepływu, której wyniki podlegały analizie statystycznej rozkładów w populacji komórek siatki obliczeniowej.

Rozdział metodyki zakończony jest opisem metody analizy statystycznej wyników serii symulacji oraz oceną pozyskanych wartości miar rozproszenia rozkładów w funkcji zmian konstrukcji i warunków brzegowych, konkludując o stopniu zdatności metody.

W rozdziale *Dyskusja* przedstawiony został zakres badania w perspektywie stanu wiedzy i techniki. Uwzględnione zostały uzasadnienia i objaśnienia przyjętych metod i modeli, z jednoczesnym wskazaniem możliwych usprawnień metody oraz dalszych kroków mogących wymagać podjęcia.

Rozprawa zakończona jest rozdziałem *Wnioski* wskazującym na implikacje obserwacji.

2 Tezy i cel pracy

2.1 Cel pracy

Celem pracy jest zwiększenie efektywności wykorzystania żywicy wymiany jonowej przez opracowanie metody projektowania i optymalizacji w funkcji jednorodności wykorzystania pojemności jonowej dla rozwiązania technicznego pasywnego sterowania gradientami ciśnienia w zbiornikach wymiany jonowej przeznaczonych dla zmywarek użytku domowego, zastrzeżonego pod numerami: PCT/CN2020/083801, WO 2021/203313 oraz EP 3962867 A0.

2.2 Teza

Teza 1

Innowacyjna metoda projektowania zbiornika wymiany jonowej umożliwia maksymalizację wykorzystania surowca wykorzystywanego w wymiennikach jonowych.

Teza 2

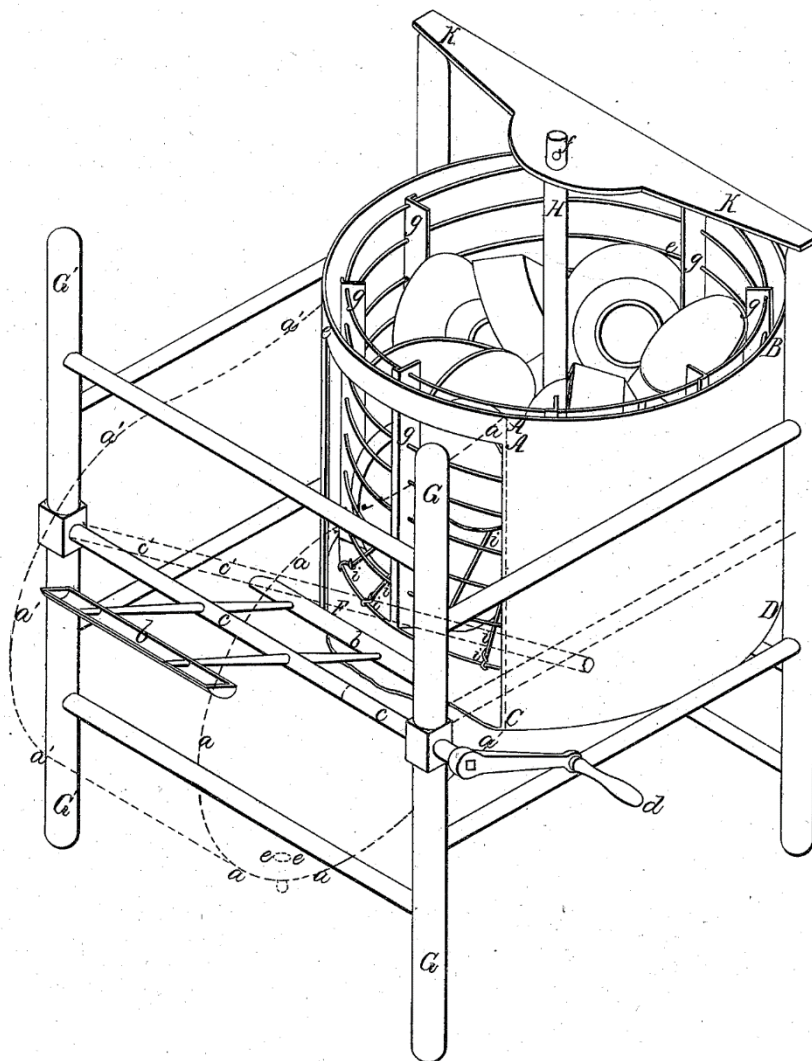
Zmiana geometrii zbiornika wymiany jonowej, a w szczególności zmiana geometrii otworu dławienia kanału regulacji ciśnienia prowadzi do zmiany homogenizacji prędkości przepływu wewnątrz zbiornika wymiany jonowej, a tym samym umożliwia maksymalizację wykorzystania surowca wykorzystywanego w wymiennikach jonowych.

3 Stan techniki

3.1 Proces przemysłowy projektowania urządzeń gospodarstwa domowego na przykładzie zmywarki domowej

3.1.1 Pierwsze zmywarki przemysłowe

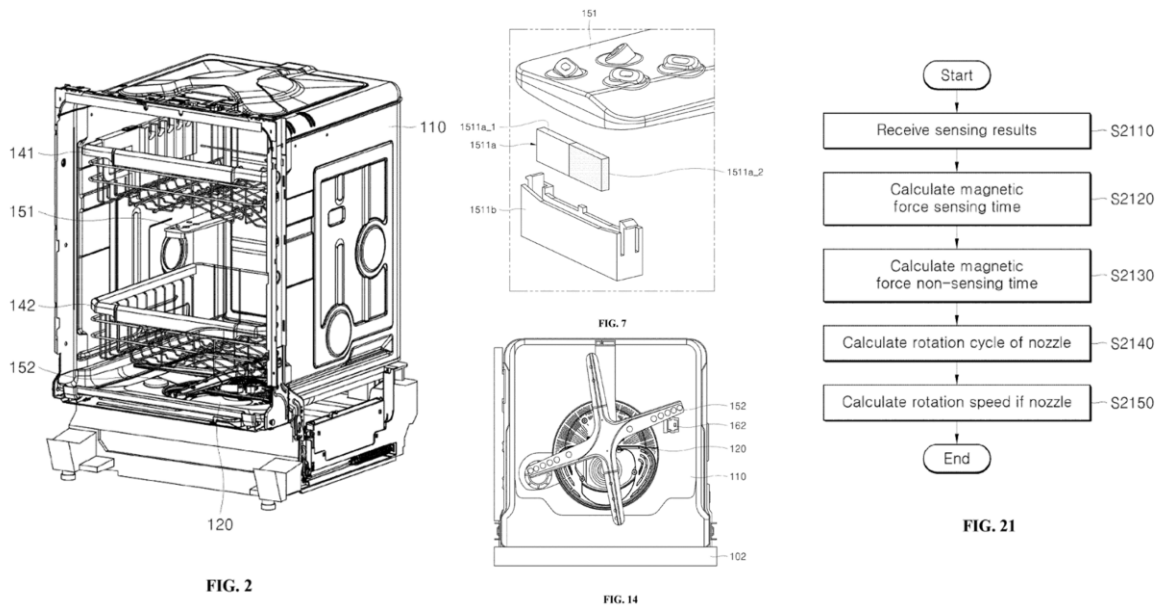
Choć narzędzia usprawnienia prac wynikających z prowadzenia osiedleńczego trybu życia towarzyszą ludzkości od czasów neolitu[1], pierwsze podejścia do automatyzacji mycia naczyń datować można dopiero na wiek XIX – w roku 1850 amerykański wynalazca Joel Houghton złożył w Urzędzie Patentowym Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej wniosek o przyznanie patentu na urządzenie automatyzujące ten proces[2]. Schemat konstrukcyjny rzeczonożego urządzenia przedstawiony został na rys. 1.



Rys. 1 Schemat konstrukcyjny pierwszej chronionej przemysłowo zmywarki wg patentu Joela Houghtona z 1850 roku [2]

Proces rozwoju zmywarek domowych, od drewnianych skrzyń z obrotowym drucianym bębniem i odpowiednikiem koła młyńskiego dla wymuszenia cyrkulacji wody do optymalizowanej formy znanej dziś, był wynikiem stopniowej ewolucji technologicznej w obszarach automatyzacji przemysłowej wytwarzania, inżynierii mechanicznej, nauk chemicznych oraz zmieniającego się stopniowo środowiska regulacji prawnych.

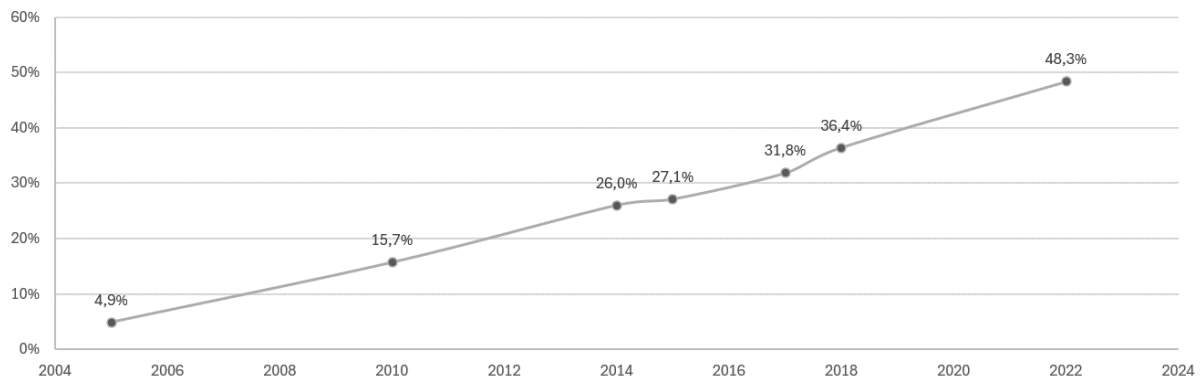
Przykład współczesnej konstrukcji zmywarki[3] wraz ze schematem logiki urządzenia przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2 Przykład aktualnego stanu techniki dla zmywarek – rysunki n. 2/7/14/21 patentu n. US 2024/0057842 A1 [3] zawierające rzuty konstrukcji rozwiązania oraz schemat logiczny sterowania inteligentnego

3.1.2 Funkcjonalności układu zmywarki

Cytując ks. Benedykta Chmielowskiego: „koń jaki jest, każdy widzi” – podstawowa funkcjonalność zmywarki do naczyń zawarta jest w samej nazwie urządzenia. Ponadto powszechność zmywarek domowych w Polsce w ostatnich dwóch dekadach wzrosła istotnie – udział gospodarstw domowych posiadających zmywarę zwiększył się z 4,9% w roku 2005 do 48,3% w roku 2022[4], co daje prawie dziesięciokrotny wzrost na przestrzeni 18 lat. Historyczny zarys procentu gospodarstw domowych wyposażonych w zmywarę został przedstawiony na rys. 3.

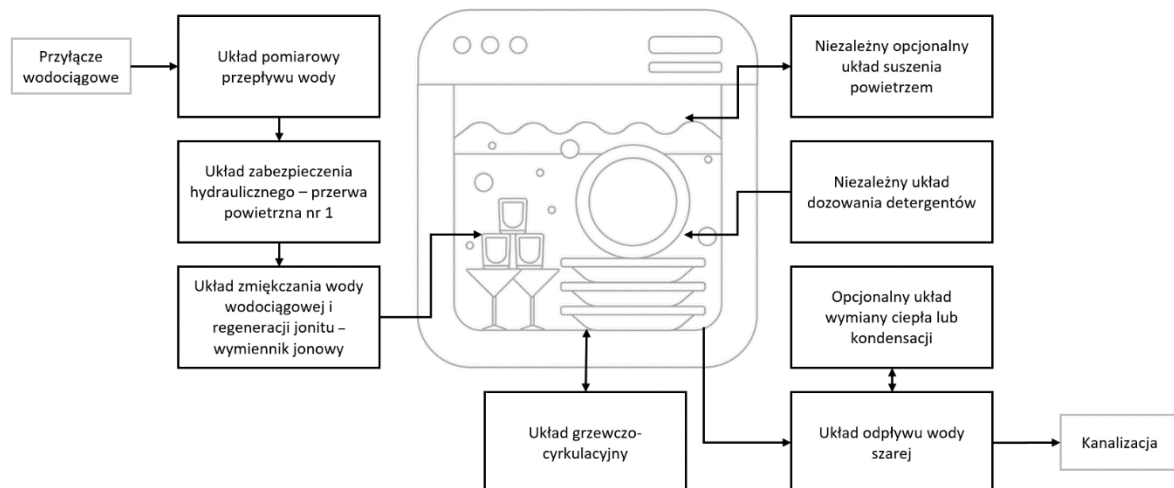


Rys. 3 Historyczny procent gospodarstw domowych wyposażonych w zmywarę do naczyń w Polsce

Nie byłoby jednak możliwe usprawnianie procesów zmywania bez dogłębnego zrozumienia fizyki stojącej za funkcjami składowymi. Na proces skutecznego zmywania naczyń składa się szereg funkcjonalności zapewnianych przez wewnętrzne układy hydrauliczne urządzenia[3]:

- układ przyłącza i pomiaru ilości wody wlotowej;
- układ zabezpieczenia wody wodociągowej przed zanieczyszczoną wodą;
- układ zmiękczenia wody wodociągowej i regeneracji;
- opcjonalny układ wymiany ciepła/kondensacji;
- układ grzewczo-cyrkulacyjny wraz z ramionami myjącymi;
- układ przekierowania odpływu wody szarej;
- układ zabudowy komory zmywania;
- niezależny hydraulicznie układ dozowania detergentów oraz środków wspomagających suszenie;
- opcjonalny niezależny układ suszenia powietrzem.

Przykładowy rozkład i interakcje listowanych układów hydraulicznych został przedstawiony na rys. 4.

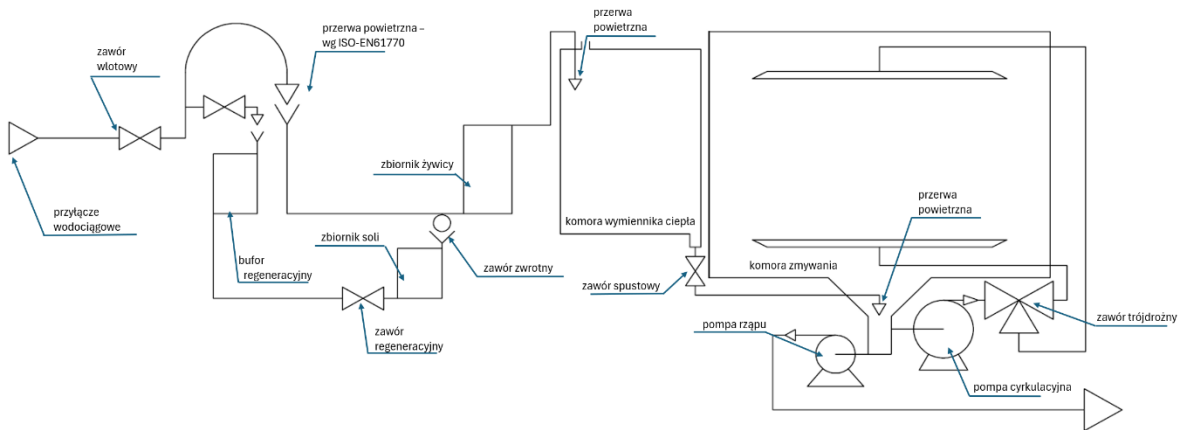


Rys. 4 Schemat ideowy relacji przykładowych układów hydraulicznych zmywarki domowej, opracowanie własne

Za koordynację pracy poszczególnych elementów hydraulicznych odpowiada centralny moduł sterujący urządzenia, zapewniając, w funkcji zbieranych przez czujniki w urządzeniu dane, następującą kolejność etapów zmywania[5]:

1. usuwanie osadu zabrudzeń naczyń;
2. płukanie naczyń/sanitacja;
3. suszenie.

Przykładowy schemat hydrauliczny zmywarki domowej przedstawiono na rys. 5.

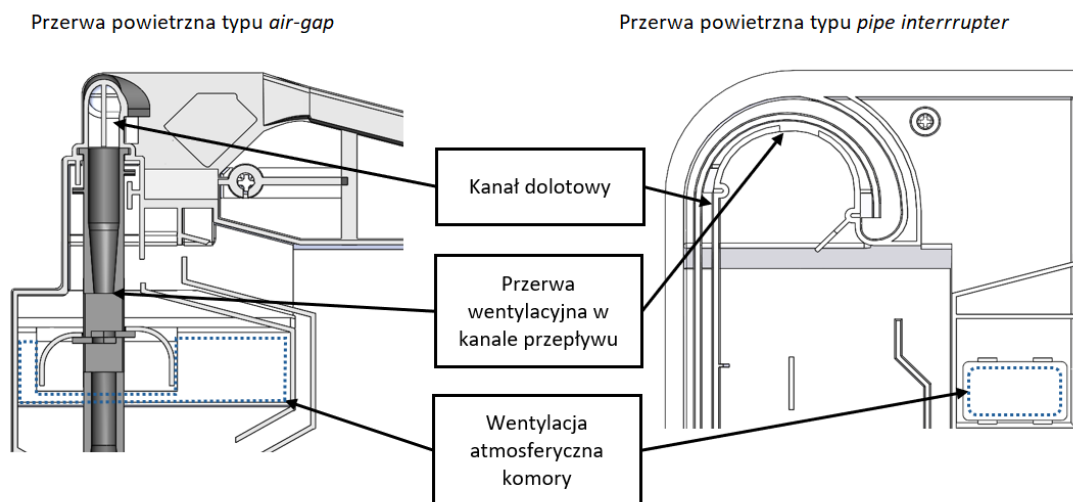


Rys. 5 Schemat hydrauliczny przykładowej zmywarki domowej wyposażonej w kondensacyjny wymiennik ciepła, opracowanie własne

Zgodnie ze schematem widocznym na rys. 5 uruchomienie procesu zmywania zaczyna się od aktywacji zaworu wlotowego wody wodociągowej, który pozostaje otwarty przez uprzednio zdefiniowany przez producenta zmywarki okres dla układów bazujących na mechanicznych regulatorach przepływu lub przez zdefiniowany przez producenta zmywarki zakres pomiarowy dla urządzeń bazujących na bezpośrednim pomiarze przepływu wlotowego przez umieszczony w układzie przyłączeniowym przepływomierz.

Odmierzona ilość wody wodociągowej trafia następnie do przerwy powietrznej, zdefiniowanej przez prawne wymagania dopuszczenia do sprzedaży rynkowej, której rolą jest zapobieżenie przedostaniu się wody z jakiegokolwiek układu zmywarki do układu wodociągu w wypadku wystąpienia podciśnienia w układzie wodociągowym lub nadciśnienia w układzie urządzenia. Przerwy powietrzne są częścią funkcjonalną pozwalającą konwertować energię potencjalną ciśnienia płynu na energię kinetyczną – pozwalają zachować znaczną porcję energii strumienia wody wodociągowej przy przejściu przez fragment otwartego na ciśnienie atmosferyczne kanału przepływu.

Przekroje przykładowych przerw powietrznych zostały przedstawione na rys. 6.



Rys. 6 Przekroje rynkowych przykładów dwóch stosowanych typów przerw powietrznych, za obowiązującą normą[6]

Zachowanie energii strumienia jest konieczne dla zagwarantowania możliwości przepływu wody przez kosztowny hydraulicznie etap dejonizacji – z uwagi na opisaną w kolejnym rozdziale rolę, jaką odgrywa twardość wody w ujęciu skuteczności procesu zmywania, woda wodociągowa przepuszczona zostaje

przez zamknięte w szczelnej obudowie złożę filtracyjne granulatu pozwalającego na wychwycenie jonów wapniowych i magnezowych z jej objętości.

Element złoża granulatu wymiany jonowej w zależności od zdefiniowanego (przez poziom stężenia jonów wapniowych i magnezowych) przez użytkownika stopnia twardości wody wodociągowej, podlega okresowej regeneracji przez wymuszenie odwróconej wymiany w bliskim nasyceniu roztworze chlorku sodu.

Woda poddana zmiękczeniu może następnie, w zależności od konstrukcji urządzenia i rozważanego etapu procesu, zostać poddana obróbce termicznej w wymienniku ciepła, wykorzystana jako masa termiczna dla usprawnienia kondensacji w procesie suszenia lub trafić bezpośrednio do oddzielnego kolejną wymaganą regulacyjnie przerwą powietrzną układu komory zmywania.

Układ komory zmywania składa się z wentylowanej atmosferycznie szczelnej hydraulicznie komory zmywania, której dno o zapewnionym spadku hydraulicznym kieruje wodę do centralnie umieszczonego zagłębienia połączonego kanałami hydraulicznymi z przynajmniej dwoma układami hydraulicznymi.

Pierwszym układem hydraulicznym umieszczonym grawitacyjnie poniżej poziomu dna komory zmywania jest układ pompy cyrkulacyjnej, wyposażony również w urządzenie grzewcze, którego rolą jest podgrzanie i zapewnienie ciągłej cyrkulacji wody procesowej celem wykorzystania energii mechanicznej i termicznej płynu dla etapów usuwania osadów zabrudzeń, płukania oraz przygotowania do suszenia.

Wylot układu cyrkulacyjno-grzewczego połączony jest zwyczajowo z wirującymi ramionami zmywarki przy pomocy zaworów przekierowujących – wykorzystanie zaworu przekierowującego pozwala na częściowe obniżenie ilości wody potrzebnej dla procesu mycia oraz zmniejszenie koniecznego wydatku hydraulicznego pompy dla zapewnienia dostatecznego poziomu energii kinetycznej strumienia wody dla napędzenia ramion myjących przy odrywaniu osadów zabrudzeń z naczyń.

W zdefiniowanym przez projektanta programu momencie, zwyczajowo podczas cyrkulacji i na końcowym etapie grzania wody dla poszczególnych etapów, następuje aktywacja niezależnego układu dozowania chemii myjącej lub usprawniającej suszenie.

W przypadku chemii myjącej są to oparte na silnie zasadowych środkach powierzchniowo czynne proszki, tabletki lub żele poprawiające penetrację osadów zabrudzeń lub poprawiające parametry mechaniczne strumienia myjącego przez wprowadzenie czynnika tarcia.

W przypadku chemii poprawiającej suszenie są to oparte na silnie kwasowych środkach powierzchniowo czynne płyny lub żele, których celem, oprócz poprawy kąta zwilżania medium procesowego na ostatnim etapie hydraulicznym – przygotowania do suszenia, jest neutralizacja silnie zasadowych osadów chemii myjącej. W przypadku coraz większej grupy producentów urządzeń możliwe jest stosowanie naturalnych i zdalnych do spożycia płynów o niskim pH, takich jak sok z cytryny czy ocet kuchenny.

Każdy etap procesu będzie wiązał się z przynajmniej jedną wymianą krążącej w obiegu komory zmywania wody, polegając na aktywacji drugiego układu hydraulicznego komory zmywania.

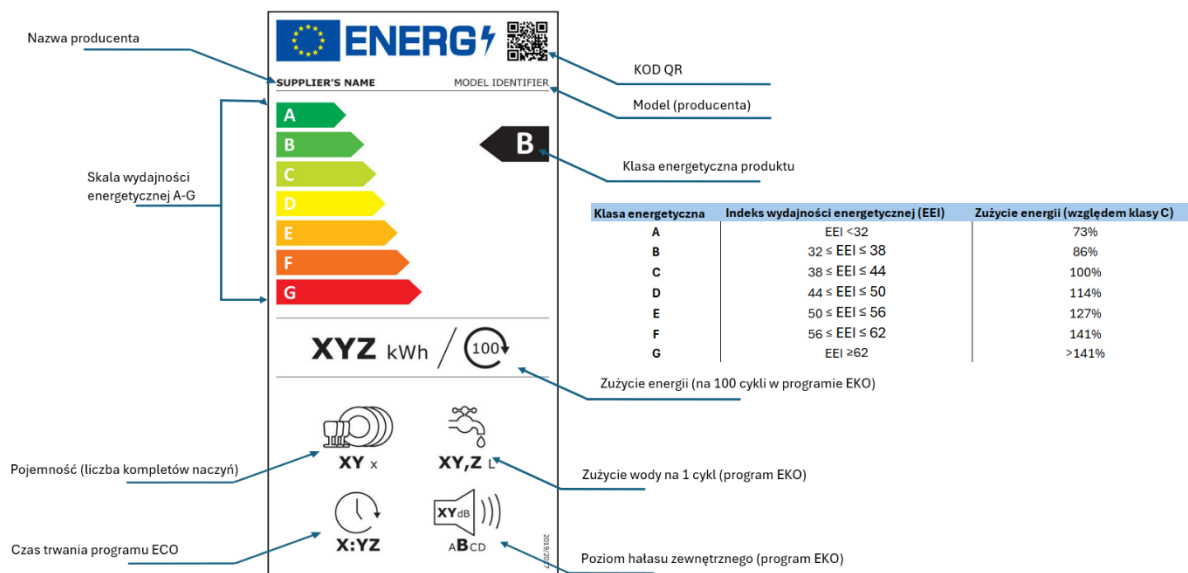
Drugi układ hydrauliczny zagłębienia w dnie komory zmywania, osadzony na najniższym grawitacyjnym poziomie hydraulicznym komory zmywania i zwany pompą rząpu, zapewnia możliwość aktywnego odprowadzenia wody poprocesowej do kanalizacji. Układ składa się z pompy odśrodkowej oraz kanału odpływowego z kolankiem hydraulicznym, zapobiegającego przedostawaniu się zapachów z układu odprowadzenia ścieków do wnętrza zmywarki.

3.1.3 Regulacje energetyczne – EU Energy Label

Nieustannie rosnąca świadomość ryzyka dla zdrowia publicznego oraz ekologicznych konsekwencji powszechności użycia produkowanych przemysłowo urządzeń korzystających z zasobów wody pitnej oraz energii elektrycznej sprawiła, że dla dużej części rynków światowych kluczowym czynnikiem wpływającym na rozwój urządzeń jest horyzont regulacji prawnych.

Na przykładzie rynku Unii Europejskiej: regulowane są nie tylko wymogi techniczne urządzeń gospodarstwa domowego[7], wymogi techniczne dla urządzeń przyłączonych do przyłączy wody wodociągowej[8], lecz również wymogi znakowania efektywności energetycznej urządzeń[9], [10]. W ujęciu rentowności produkcji producentów urządzeń gospodarstwa domowego przez utrzymanie lub wzrost udziału rynkowego krytycznym składnikiem wpływającym na ocenę konkurencyjności urządzenia nie będą wymogi ISO EN stanowiące warunki *sine qua non* dopuszczenia rynkowego, lecz wytyczne dla wymogu znakowania urządzeń, które w przypadku dużego AGD może odgrywać istotną rolę przy decyzji konsumenta[11], [12].

Objaśnienie układu etykiety oraz objaśnienie klas energetycznych zmywarek domowych zostało przedstawione na rys. 7.



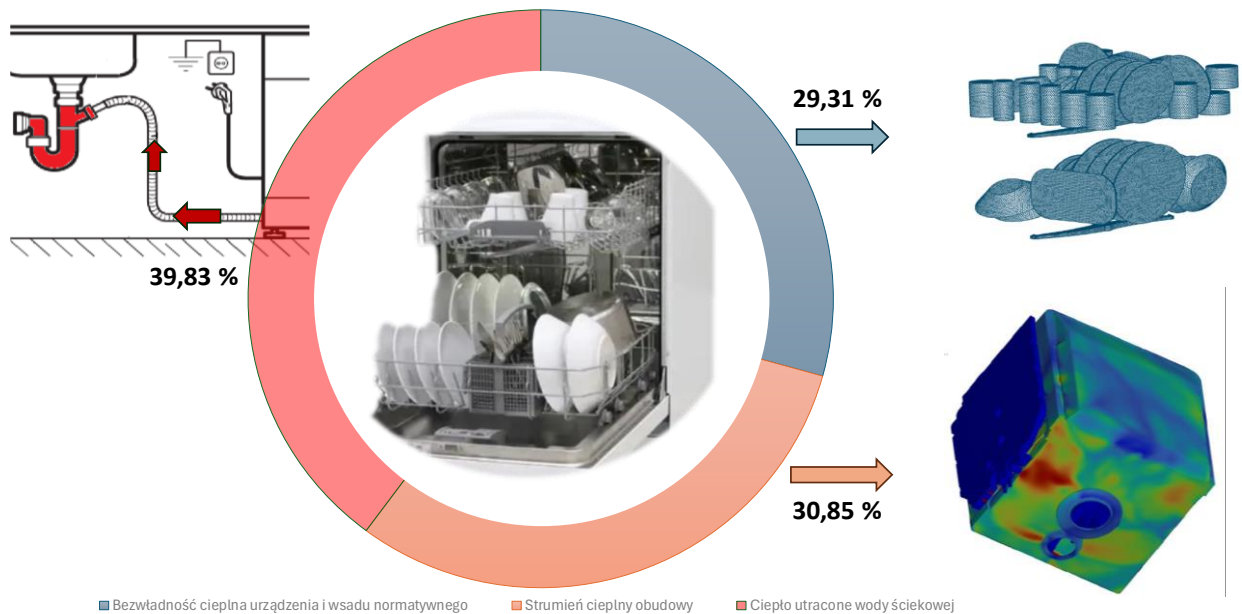
Rys. 7 Objąśnienie etykiety wydajności energetycznej Energy Label i objaśnienie indeksów wydajności energetycznej EEI[9], [10]

Krytycznymi czynnikami w ujęciu regulacji klasyfikujących urządzenia w funkcji całkowitego zużycia energii oraz ilości wody zużytej w procesie mycia są[13]:

1. systemy izolacji termicznej urządzenia zmniejszającej całkowite straty ciepłne urządzenia;
2. wykorzystane technologie pomp i silników pozwalające zmniejszyć straty sprawności mechanicznej urządzenia;
3. wykorzystane technologie czujnikowe pozwalające na obniżenie zużycia energii lub wody w funkcji mierzonych parametrów mycia;
4. optymalne programy oszczędzania energii – dobór logiki pracy w funkcji maksymalizacji efektów mycia, minimalizacji strat termicznych w czasie;

5. technologie poprawiające proces suszenia pozwalające obniżyć wymaganą energię termiczną wsadu na etapie przygotowania do suszenia;
6. automatyczne wyłączenie – obniżanie zużycia energii w trybie gotowości;
7. interfejsy użytkownika – przez nakłanianie użytkowników do efektywnego wykorzystywania urządzenia.

Udział zmierzony obszarów utraty energii termicznej z badań własnych przedsiębiorstwa został przedstawiony na rys. 8.



Rys. 8 Wykres kołowy obszarów utraty doprowadzonej do procesu zmywania energii cieplnej, pomiar w programie „eko” urządzenia klasy energetycznej A roku 2023, opracowanie własne

Stan regulacji energetycznych przewiduje wyłącznie techniczną ocenę efektywności energetycznej, plasując ją w ujęciu całokształtu rynku[9], nie biorąc pod uwagę całkowitego wydatku energetycznego i śladu węglowego będącego skutkiem produkcji urządzenia[14].

Publikacje naukowe dotyczące wpływu środowiskowego urządzeń przedstawiają możliwe metody poprawy kryteriów oceny energetycznej i znakowania przez np. możliwość użycia parametru całkowitego kosztu użytkowania urządzenia w funkcji cyklu życia[12] lub metod oceny cyklu życia jako parametru ekologicznego w ujęciu kosztu węglowego produkcji[14].

Przykładem regulacji przyjmujących podobne założenia jak sugerowane przez publikacje, może być regulacja z roku 2023 dotycząca oceny baterii przez pryzmat śladu węglowego generowanego przez ich produkcję[15].

Reasumując: możliwe jest, że w perspektywie najbliższych lat będzie można spodziewać się dodatkowego czynnika regulacyjnego, narzucającego minimalizację użycia surowców lub energii w procesie produkcji.

3.1.4 Proces projektowania kompletnego układu – rola prac zleconych

Producent sprzętu AGD, podejmując pracę nad nową platformą sprzętową dla urządzeń gospodarstwa domowego, narażony jest na ogromnej skali inwestycje związane z liniami produkcyjnymi czy integracyjnymi dla nowego sprzętu. Na przykładzie danych inwestycyjnych GE appliances – koszt uruchomienia nowej linii produkcyjnej zmywarek w roku 2021 w stanie Kentucky w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej wyniósł około 80 mln dolarów amerykańskich (USD)[16], co w przeliczeniu kursowym na dzień publikacji artykułu odpowiadało 308,17 mln polskich złotych (PLN). Na przykładzie kosztu uruchomienia linii producenta Haier dla uruchomienia fabryki zmywarek w Eskişehir w centralnej Turcji w roku 2021 wyniósł około 85 mln euro (EUR)[17], co na dzień publikacji artykułu odpowiadało 392,7 mln PLN.

Cytowane koszty inwestycji uruchomienia produkcji dotyczą wyłącznie linii produkcyjnych składających się z procesów wytworzenia i integracji elementów metalowych obudowy zmywarek oraz integracji komponentów kupowanych przez producentów jako gotowe systemy w ramach ruchomej linii produkcyjnej. Do elementów zakupowych można zaliczyć panele sterowania, elektronikę sterowania, kosze oraz pełen układ hydrauliki, w tym węże przyłączeniowe z zaworami, komory wodne wlotowe, zmiękczacze wody, pompy cyrkulacyjno-grzewcze, zawory przekierowujące, ramiona myjące, pompy odpływowe, czujniki i inne elementy, których użycie zależy od wersji wytwarzanego urządzenia.

Przykładowe zdjęcia linii integracyjnych producentów zmywarek domowych zostały przedstawione na rys. 9.

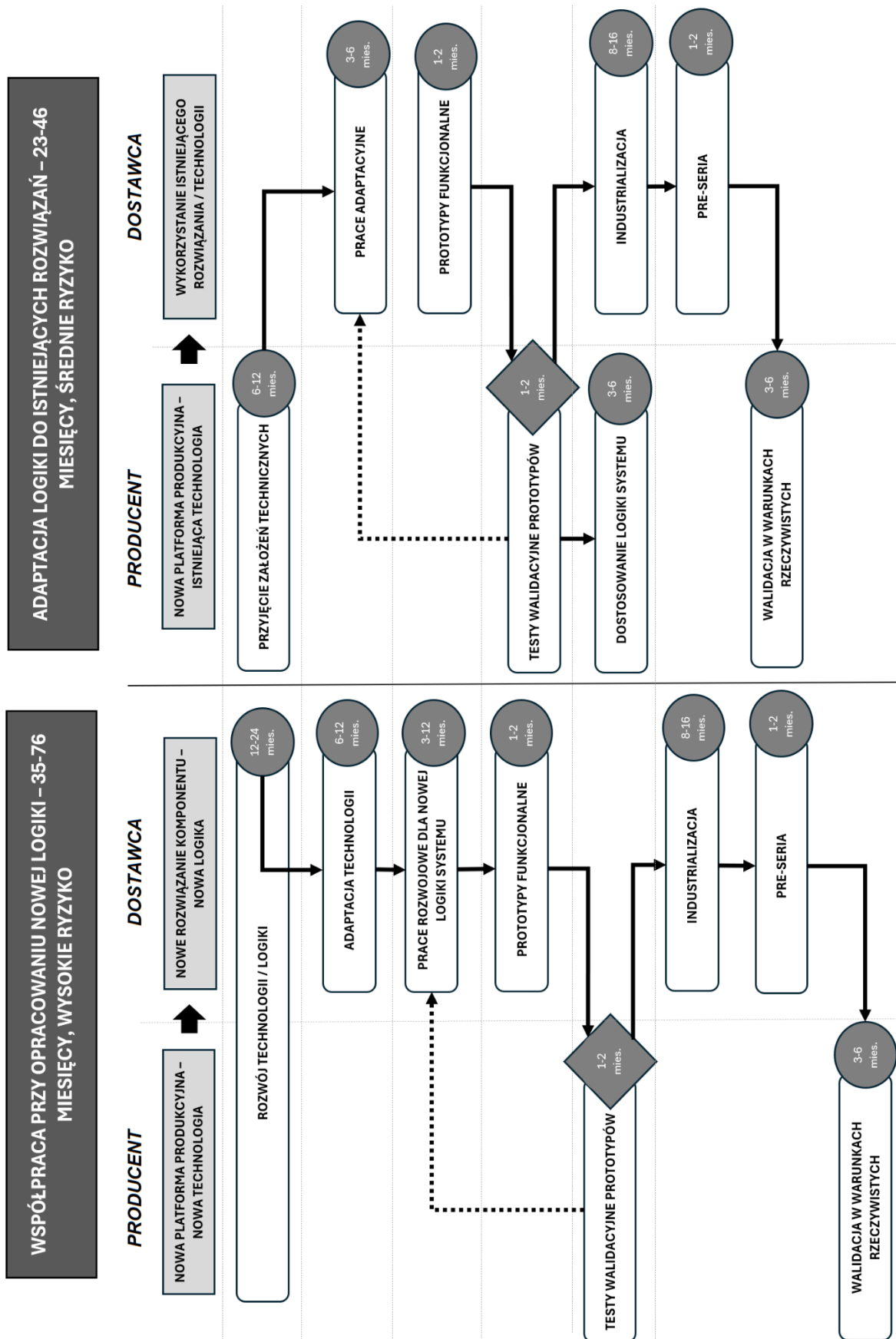


Rys. 9 Przykładowe linie integracyjne zmywarek domowych ze strony internetowej producenta QS-Group[18]

Z uwagi na wysoki poziom złożoności kompletnego układu czas prac rozwojowych nad każdą iteracją platformy produkcyjnej urządzenia waha się od 4 do 8 lat, w zależności od producenta. Z uwagi na bardzo wysoki koszt prowadzenia pełnych prac rozwojowych dla kompletnego systemu uwzględniającego pełną integrację i kongruencję podsystemów kupowanych przez producentów powszechną praktyką jest zlecanie prac rozwojowych dla komponentów zakupowych, a skala prac rozwojowych prowadzonych samodzielnie przez producenta zależy od kultury technicznej organizacji, segmentu udziału rynkowego oraz skali inwestycji, którą producent jest gotów ponieść. Przyjmuje się, że producenci rozpoznawalnych i prestiżowych marek inwestują więcej w samodzielne prace badawczo-rozwojowe nad kompletnymi układami, a następnie zlecają opracowanie skrojonych na wymiar rozwiązań komponentowych o szczegółowo zdefiniowanych parametrach technicznych. Przykłady kongruencji konstrukcji rynkowych zmywarek marek Miele, Bosch-Siemens czy Electrolux potwierdzają taki pogląd, aczkolwiek przykład konstrukcji zmywarek Samsung, marki bardzo popularnej i rozpoznawalnej, pokazuje, że kierunek zakupu gotowych uniwersalnych rozwiązań komponentowych, a następnie projektowanie urządzenia końcowego do ich zintegrowania również może być akceptowalną strategią dużego producenta o wysokiej rozpoznawalności.

Ścieżka samodzielnego rozwoju produktu u producenta pozwala na obniżenie udziału kosztu nakładów prac rozwojowych w cenie każdego komponentu zakupowego kosztem podwyższonego nakładu inwestycyjnego przy opracowywaniu platformy, pozwalając na zwiększenie udziału marży w sprzedaży urządzenia w dłuższym terminie – uzasadnia to, dlaczego taka praktyka ma miejsce niemal wyłącznie w przypadku producentów o dużym udziale w rynku.

Zestawienie uproszczonych procesów rozwoju platformy produktowej w scenariuszach wykorzystania istniejących technologii i rozwinięcia nowych technologii opracowania własnego zostały przedstawione na rys. 10.



Rys. 10 Zestawienie przepływu procesów rozwoju platformy produktowej w scenariuszach 1) wykorzystania istniejących technologii i 2) rozwinięcia nowych technologii, opracowanie własne

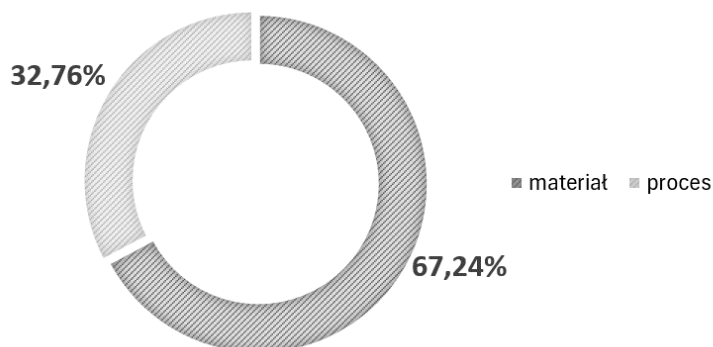
3.1.5 Metodyka CBD (*cost break-down*)

Rozważając rolę prac zleconych w procesie projektowania i wytworzenia wyrobu, za powszechną praktykę, szczególnie w ujęciu zaopatrywania w komponenty produkcji o skali powyżej miliona sztuk wyrobu gotowego rocznie, można uznać składanie ofert w metodyce *cost break-down* (CBD). Metodyka wymagana przez dużych producentów nakazuje rozdzielenie całkowitego kosztu produktu na części składowe, uwzględniające koszty materiałów surowych, energii, stałe administracyjne generowane przez produkcję komponentu, amortyzowany koszt inwestycyjny prac badawczo-rozwojowych nad produktem, amortyzowany koszt inwestycyjny linii produkcyjnej, marżę, zysk kalkulacyjny czy inne składniki wchodzące w całkowity kształt ceny ofertowej komponentu.

Zwyczajowo udział kosztu materiałowego, energii i amortyzacji inwestycji w linię produkcyjną w perspektywie produkcji wielkoseryjnej oczekiwany jest przez producentów urządzeń końcowych na poziomie ok. 65–75% całkowitej ceny produktu, z czego koszt materiałowy oscyluje, w zależności od wymagań technicznych i udziału procesów wewnętrznych producenta, w okolicy połowy udziału całkowitego kosztu.

Udział zależy jest od użytych typów materiałów, wymaganych procesów, lecz przede wszystkim od ilości użytego surowca – optymalizacja ilości użytego materiału przy zapewnieniu pożądanego poziomu funkcji zależna jest bezpośrednio od doskonałości technologicznej podmiotu projektującego i produkującego podzespół.

Przykładowy udział kosztu materiałowego oraz odpowiadającego mu formatu ofertowego z pominięciem danych niejawnych został przedstawiony na rys. 11–12.



Rys. 11 Proporcja udziału kosztu materiału i kosztu procesu w wytworzeniu produktu na przykładzie rzeczywistego zaworu wielodrożnego sterowanego silnikiem krokowym, dane własne

Supplier Cost Break Down- h

Basic Data		Remarks: - cost calculation based on total quantity of 1 mio pcs. and contract duration of 5 years and material and production cost of September 2023;									
Supplier		PRESENTED PRODUCTION COST ARE BASED ON PRODUCTION OF 200K ANNUALLY!									
Part Name		Option 1: with hose assembly and assembly cost									
Part Number		Version: 1									
Drawing Number											
Annual quantity											
Delivery lot size											
Payment terms (days)											
Incoterms											
Material Related Cost											
Raw Material		Supplier		Quality / Specifications		Gross Input (incl. losses)		Net Input (without losses)		Unit	
Auxiliary Material											
Purchased Components											
External Processing											
Pos											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
Production Cost											
Po		Operation / Process Step		Type of Machine / Size		Special Machine BSH		Number of pcs per cycle		Cycle time in s	
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
Total Product Cost and Pricing											
Material Cost		EUR/pc		%		Total		BSH-Invest (Tools, Devices, ...)		Signature	
Production Cost		EUR/pc						Item			
Manufacturing Cost		EUR/pc									
Selling, General and Administrative Expenses		EUR/pc									
Prime Costs		EUR/pc									
Profit Margin		EUR/pc									
Additional Specific Investment Share (e.g. Tools)		EUR/pc									
Transport		EUR/pc									
Packaging		EUR/pc									
Price		EUR/pc									

Rys. 12 Formularz CBD produktu rzeczywistego z zakreślonymi danymi niejawnymi, dane własne

3.1.6 Podzespoły

Podzespoły wykorzystywane w produkcji docelowej zmywarki można podzielić na wytwarzane przez producenta w lokalizacji linii produkcyjnej końcowego urządzenia oraz podzespoły zakupowe.

Dyktowaną przez warunki ekonomiczno-logistyczne praktyką jest wykonywanie elementów skutkujących trudnym procesem logistycznym na miejscu, a zlecenie produkcji elementów specjalistycznych wyspecjalizowanym producentom.

Do podzespołów zwyczajowo produkowanych w miejscu produkcji końcowej zwyczajowo zalicza się obudowy blaszane urządzeń z uwagi na bardzo duży spadek pozornej gęstości obudowy konstrukcyjnej w swoim obrysie, co skutkowałoby bardzo wysokim nakładem kosztu na transport – powszechną praktyką jest umieszczanie linii cięcia, gięcia i spawania blachy w bezpośredniej bliskości linii montażowej kompletnego urządzenia – stosowane przez przemysł optymalizacje w tym zakresie niejednokrotnie rozbijają się o skrócenie łańcucha logistycznego o kilka metrów dla osiągnięcia większej wydajności kosztowej procesu. Transport rolek blachy o wysokiej gęstości jest znacznie bardziej efektywny.

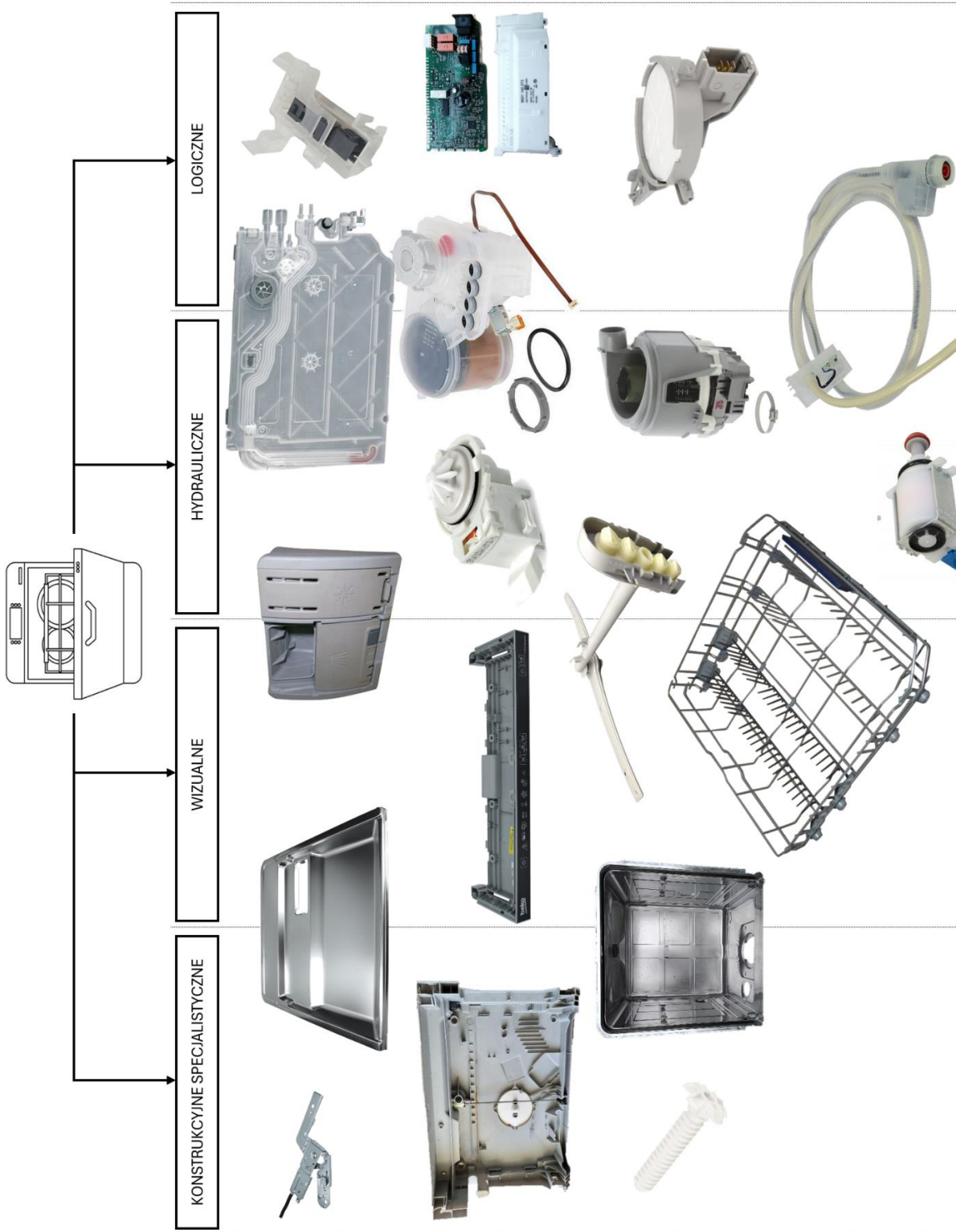
Kolejnymi elementami, których wytwarzanie producenci decydują się ulokować w miejscu produkcji, są formowane wtryskowo cienkościenne podstawy zmywarek, odznaczające się porównywalnym do obudów blaszanych obrysem rzutu z góry oraz porównywalnym pozornym spadkiem gęstości w obrysie transportowym komponentu – w tym wypadku argument finansowo-logistyczny jest niemal identyczny.

Pozostałe komponenty o mniejszych gabarytach czy większej pozornej gęstości, pozwalające na efektywne upakowanie w transporcie, bardzo rzadko bywają produkowane na miejscu.

Do komponentów zakupowych z perspektywy producentów zmywarek można zaliczyć grupy elementów:

- dekoracyjnych – takich jak panele sterujące, panele maskujące, ozdobne maskownice elementów;
- konstrukcyjnych specjalistycznych – takich jak zawiasy, sprężyny, śruby regulacyjne, zawiesia montażowe;
- logicznych – obwody sterujące, przewody, czujniki;
- hydraulicznych – stanowiących krwioobieg procesu mycia naczyń: kanałów, przewodów, pomp czy np. zaworów.

Drzewo takiego podziału w formie podziału ciągłego, z przykładami zdjęć przemysłowo wykorzystywanych komponentów, zostało przedstawione na rys. 13.



Rys. 13 Drzewo podziału typów komponentów zakupowych dla przykładowej zmywarki, opracowanie własne

Podzespoły hydrauliczne

Układ hydrauliczny zmywarki składa się z przynajmniej trzech odciętych od siebie wzajemnie przez przerwy powietrzne układów obiegu wody:

1. układu zasilania w wodę, składającego się z węża z zaworem przeciwwaleniowym, przewodów wewnętrznych, przepływomierza obrotowego zakończonego logicznie w punkcie realizacji wymaganej ustawowo przerwy powietrznej, czyli otwarcia kanału przepływu na ciśnienie atmosferyczne, przekształcającego energię potencjalną ciśnienia sieciowego na energię kinetyczną strumienia w niższym ciśnieniu atmosferycznym;
2. układu obróbki wody, zasilanego energią kinetyczną strumienia wody sieciowej, składającego się z kanałów doprowadzających wodę do wymiennika jonowego, zaworów przekierowujących lub umożliwiających obieg solankowy doprowadzany do wymiennika jonowego celem jego cyklicznej regeneracji, opcjonalnych komór lub kanałów wymiany cieplnej lub składowania wody procesowej, zakończonych zwyczajowo zaworem spustowym do połączonego wyłącznie grawitacyjnie punktu wlotu wody do komory myjącej;
3. układu cyrkulacyjnego mycia, opartego na otwartym rezerwuarze w dnie komory myjącej; wymuszającego alternatywnie: grzany obieg wody wewnątrz zmywarki w procesie mycia oraz napędzającego ramiona obrotowe zmywarki lub odpompowanie wody po zakończonym etapie mycia do kanalizacji lub przepływowego wymiennika ciepła, jeśli taki występuje w konstrukcji.

Przykłady komponentów w poszczególnych grupach wraz z analizą własną uśrednionego udziału masowego typów użytego surowca w procesie wytworzenia na bazie danych przedsiębiorstwa zatrudniającego autora zostały przedstawione na rys. 14.



Rys. 14 Udział masowy różnych typów surowca w kompletnym wyrobie na przykładzie pięciu typów komponentów układu hydraulicznego zmywarki, opracowanie własne

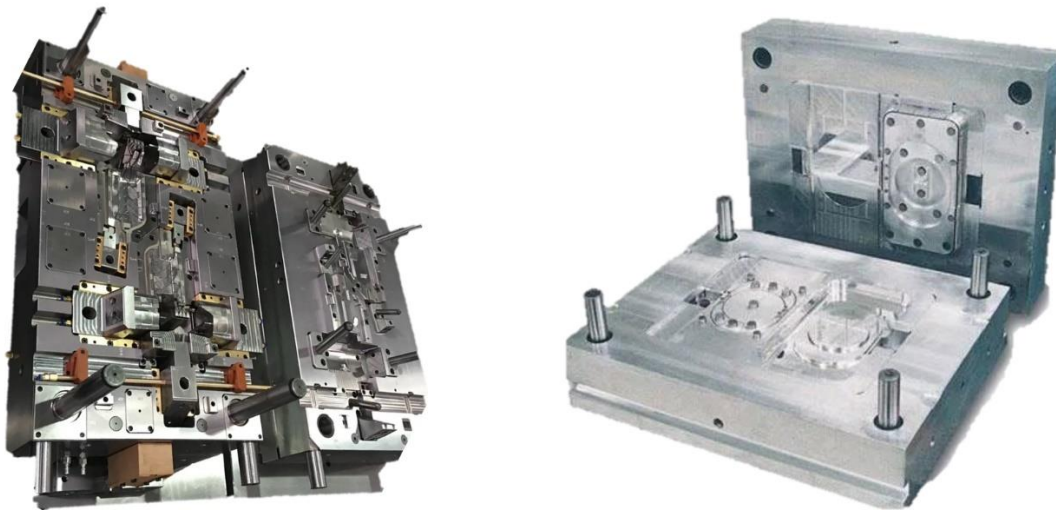
3.1.7 Technologie wytwarzania i ich ograniczenia – procesy specjalne

Dla podgrupy komponentów hydraulicznych w układzie obróbki wody zdecydowaną większość ograniczeń technologicznych w procesie optymalizacji ilości użytego surowca, w szczególności na przykładzie konstrukcji optymalizowanej w ramach tej rozprawy, stawia się procesy specjalne wtrysku oraz zgrzewania wyprasek w procesie montażu.

Wtrysk

Ograniczenia technologiczne wtrysku są wynikiem skurczu materiałowego wyprasek wtryskowych w różnych scenariuszach procesu formowania wtryskowego, ograniczeń konieczności projektowania wyrobów dla zachowania właściwego dla typu materiału zakresu temperatury wtlaczanego do formy termoplastu, ograniczeń technologicznych wynikających ze stosowanej konstrukcji elementów ruchomych formy, ich odprowadzenia ciepła w procesie wychładzania wtlaczonego materiału oraz ograniczeń geometrycznych odformowania.

Z uwagi na istotny koszt narzędzi wtryskowych dla procesów wysokoseryjnych, oscylujący w granicach między 10 000 a 50 000 EUR, dla zdecydowanej większości narzędzi o powierzchni zacisku mieszczącym się w granicy 40 000 mm², udział kosztu amortyzacji inwestycji w koszcie końcowym będzie mocno zależny od poziomu złożoności narzędzia, który z kolei będzie proporcjonalny do liczby obszarów stosowania ograniczeń dla procesu. Porównanie przykładowych różnic pomiędzy narzędziem bardzo złożonym a narzędziem prostym zostało przedstawione na rys. 15.



Rys. 15 Porównanie form wtryskowych od lewej: 1) forma złożona z hydrauliką i wieloetapowym odformowaniem, koszt rzędu ok. 50–55 k€; 2) forma typu open-close, koszt rzędu 8–10 k€

Zestaw ograniczeń dla elementów cienkościennych projektowanych dla technologii wytworzenia z polipropylenu w procesie formowania wyprasek wtryskowych, według stanu techniki [19], [20], [21] oraz wieloletniego doświadczenia zawodowego autora niniejszej rozprawy, wygląda następująco:

1. konieczność zachowania jednorodnej grubości elementu w całym zakresie przekrojów skorupy zewnętrznej z wyłączeniem wargi zgrzewu; grubość utrzymana w zakresie 1,4–1,6 mm;
2. projektowanie elementu z ciągłym uwzględnieniem osi odformowania, zwyczajowo normalnej do linii podziału formy; ściany konstrukcyjne strony odformowania powinny pozostać nachylone do osi odformowania pod kątem przynajmniej 0,5° dla dużych ścian lub 1–3° dla delikatnych elementów lub żeber;
3. projektowanie żeber usztywniających prostopadłych do ścian skorupy w wymiarze grubości 0,8–1,2 mm;
4. zachowanie środka ciężkości detalu blisko jego centrum geometrycznego;
5. próba całkowitego unikania podcięć z uwagi na trudności procesu odformowania dla kątów ujemnych;
6. podcięcia konieczne konstrukcyjnie powinny być realizowane wyłącznie w obszarach pozwalających na zachowanie sztywności wysuwanego bezkolizyjnie osobnego elementu formującego podcięcie wypraski;
7. unikanie kontaktu dwóch połówek formy lub suwaków w formie kąta wyższego niż 30° względem ich osi wzajemnego ruchu;
8. dla cech geometrycznych o wąskich tolerancjach wymiarowych, w szczególności, gdy wymagane jest zachowanie okrągłości, z uwagi na wysoki wpływ objętościowego skurczu polipropylenu,

geometria powinna gwarantować możliwie jednorodny rozkład masy w okolicy wymiaru, normalizując wpływ skurczu objętościowego na cechę.

Zgrzewanie

Proces zgrzewania, czyli trwałego termicznego łączenia przez topienie materiału dwóch lub więcej spasowanych konstrukcyjnie obrysów, stosowany jest niemal w każdym wysoko seryjnie produkowanym wyrobie charakteryzującym się mnogością kanałów oraz koniecznością zachowania szczelności.

Doświadczenie zawodowe autora w przemyśle produkcji seryjnej wyrobów zintegrowanych produkcyjnie wyprasek wtryskowych pokazuje, że do procesów trwałego łączenia termoplastów najczęściej wykorzystywane są procesy, w których energia termiczna topienia materiału pochodzi z:

1. kontaktu bezpośredniego obu stron z dedykowaną kształtem gorącą płytą – zgrzewanie gorącą płytą;
2. generowania ciepła przez docisk i tarcie w ruchu oscylacyjnym wzajemnym dużej amplitudy – zgrzewanie wibracyjne;
3. generowania ciepła przez docisk i tarcie w ruchu oscylacyjnym wzajemnym małej amplitudy – zgrzewanie ultradźwiękowe;
4. transmisji ciepła do obu stron zgrzewu z promiennika podczerwieni – metoda podczerwona,
5. kombinacji metody 4 z metodą 2 lub 3 – zgrzewanie hybrydowe;
6. pochłonięcia przez materiał energii promieniowania lasera w bezpośrednim kontakcie elementów zgrzewanych – zgrzewanie laserowe.

Z uwagi na istotne różnice w koszcie inwestycyjnym pomiędzy metodami wymienione metody zostały uszeregowane od najmniej kosztownej do wymagającej największych nakładów inwestycyjnych.

Dobór techniki zgrzewania każdorazowo podyktowany jest minimalizacją kosztu inwestycyjnego dla wymaganego konstrukcyjnie połączenia detali. Każda z metod prezentuje swoje ograniczenia i różne poziomy precyzji, a możliwość ich stosowania będzie w głównej mierze zależna od geometrii powierzchni łączenia, odchylenia powierzchni ścian łączenia od osi normalnej przyłożenia, grubości materiału podpierającego punkt tworzenia spoiny względem matrycy trzymającej element w procesie, wymagań estetycznych dla linii zgrzewu i typu materiału termoplastycznego użytego do produkcji wypraski.

W przypadku elementów w układach hydraulicznych zabudowanych w zmywarce, w przypadku których dominującym materiałem w użyciu są homopolimery lub kopolimery polipropylenu, z uwagi na możliwość projektowania linii łączenia z naddatkiem na wargę zgrzewu oraz z uwagi na brak wymagań dotyczących estetyki linii łączenia, najczęściej stosowaną techniką zgrzewania jest zgrzewanie z pomocą gorącej płyty.

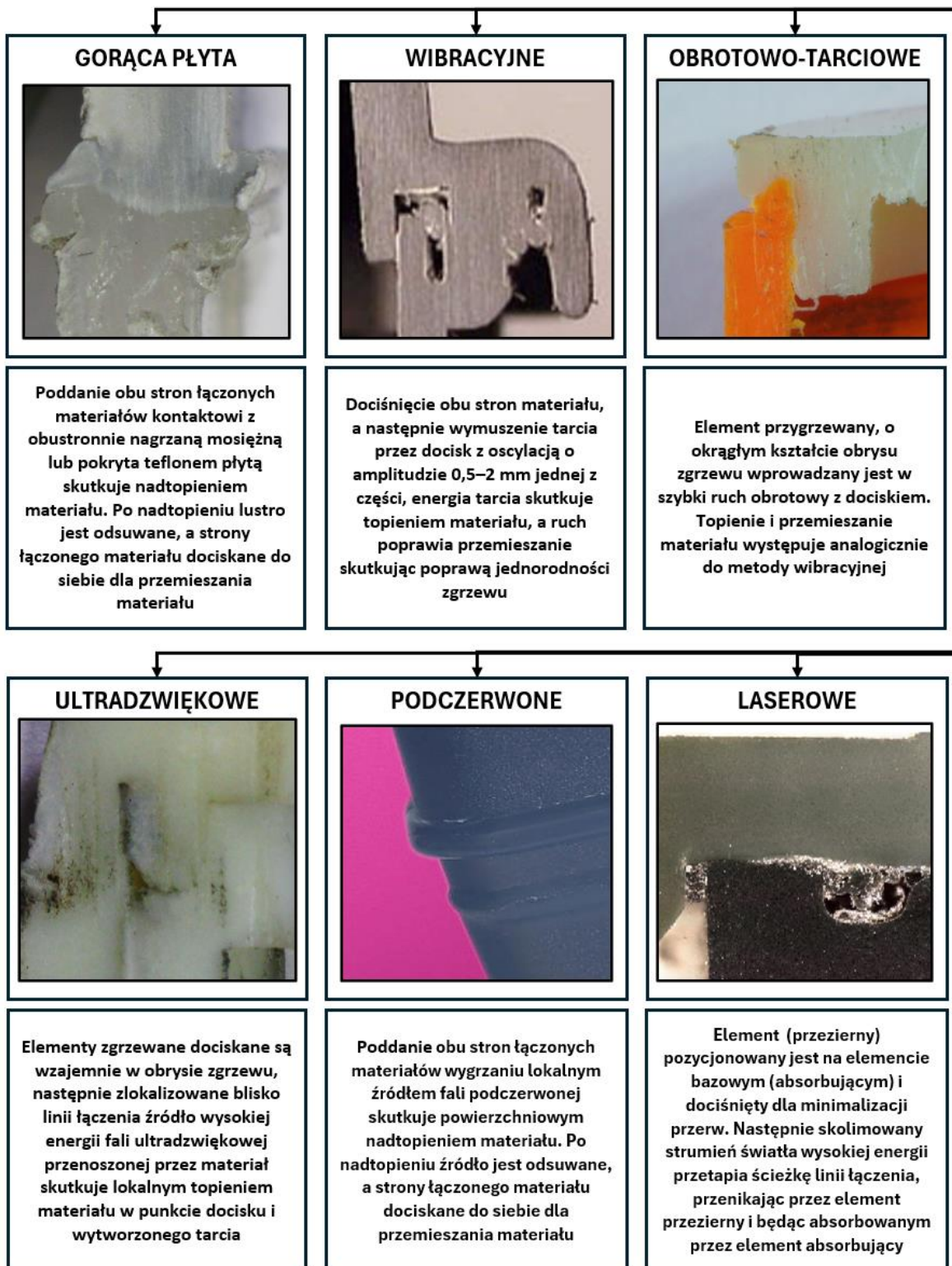
Zgodnie z wieloletnimi zawodowymi doświadczeniami autora przy projektowaniu wyprasek przeznaczonych do integracji w procesach przemysłowych, ograniczeniami konstrukcyjnymi dla stosowania zgrzewania obrysów szczelnych hydraulicznie gorącą płytą są:

1. zachowanie marginesu wokół ścian zgrzewanych na poziomie większym od 5 mm;
2. umożliwienie odformowania obszarów zgrzewanych przy zachowaniu grubości skorupy wypraski zwiększonej do ok. 1,8–2,2 mm na głębokości ok. 3–5 mm;
3. utrzymanie możliwie dużej powierzchni łączenia jako jednorodnej płaszczyzny normalnej do osi przyłożenia detali – maksymalne odchylenia kątowe od płaszczyzny normalnej dla osi przyłożenia nie powinny przekraczać 25–30°.

Dodatkową wartością dodaną stosowania metody zgrzewania gorącą płytą jest możliwość trwałego łączenia więcej niż dwóch elementów podczas jednego kroku procesu – możliwe jest osadzanie innych komponentów, niejednokrotnie wykonywanych z innego materiału, w obrysie jednego z detali w taki sposób, aby obrys ścian komponentu licował się z powierzchnią zgrzewu i pozwalał na zmieszanie materiału podczas nadtapiania przez jedną ze stron lustra grzewczego, a następnie trwałe połączenie przez zamknięcie obrysu materiałem drugiego zgrzewanego elementu.

Drzewo charakteryzujące podział technologii zgrzewania termoplastów w funkcji źródła ciepła przedstawiono na rys. 16.

TECHNOLOGIE ZGRZEWANIA TERMOPLASTÓW W FUNKCJI ŹRÓDŁA CIEPŁA



Rys. 16 Drzewo technologii zgrzewania wykorzystywanych w produkcji komponentów hydraulicznych dla zmywarek wraz z opisem technologii

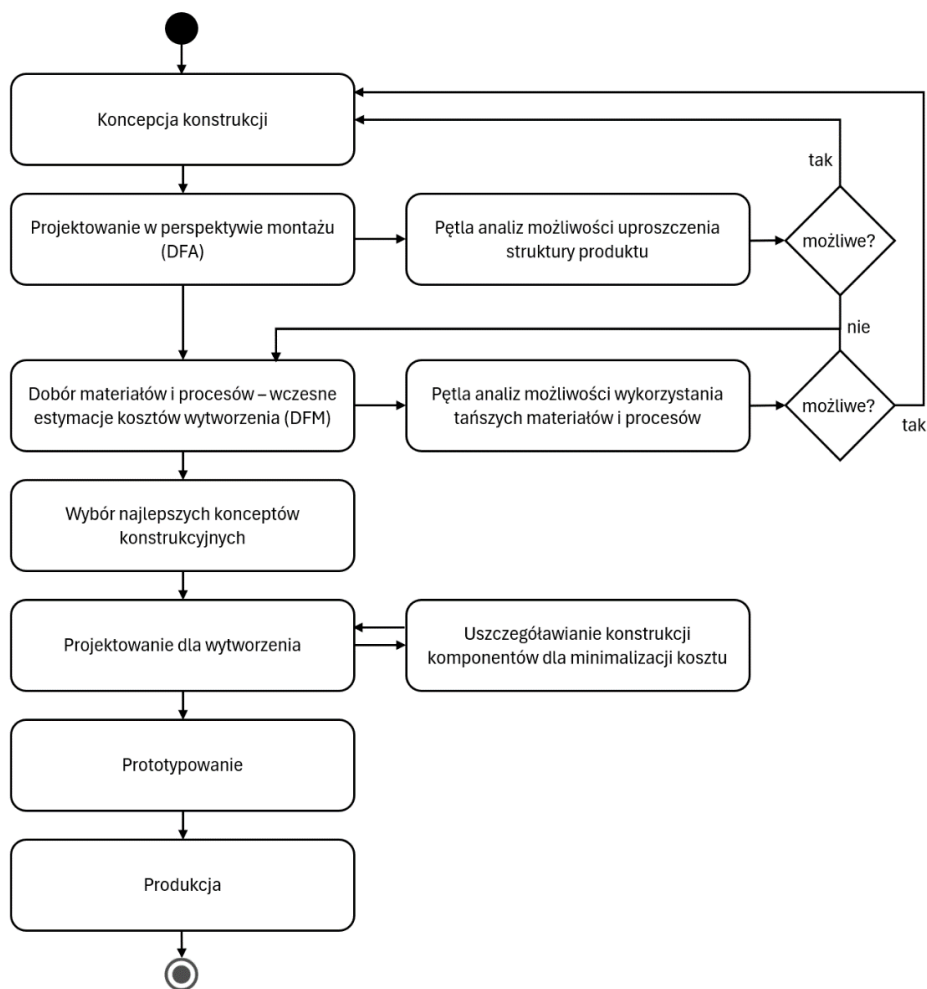
3.1.8 Metody badawcze i rozwojowe w ujęciu wytwarzania produktu

Z uwagi na charakterystykę biznesową badań przemysłowych podstawowym kryterium stosowanym przy metodach badawczych jest efektywność kosztowa stosowanych metod oraz zdolność metod badawczych do minimalizacji kosztu wytworzenia produktu.

Optymalny przemysłowo, w ujęciu całkowitego kosztu ponoszonego przez przedsiębiorstwo, proces projektowania i badań produktowych został opisany przez wielu autorów[14], [22], [23].

Powszechnie stosowaną metodą jest projektowanie dla wytworzenia i montażu (*design for manufacture and assembly*, DFMA) będące połączeniem projektowania dla wytworzenia (*design for manufacturing*, DFM) oraz projektowania dla montażu (*design for assembly*, DFA). Podwaliny dla obu metod zostały opracowane już w 1960 roku jako metoda klasyfikacji rynkowej niewielkich elementów umożliwiających automatyczne procesowanie[24]; zostały one rozwinięte w połowie lat 70. XX wieku w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej jako metody klasyfikacji kwantyfikacji korzyści kosztu wytworzenia. Ich skuteczne stosowanie w przemyśle produkcyjnym raportowane jest na koniec lat 70.[25]

DFMA rekombinuje obie metody, wykorzystując kolejne pętle iteracyjne dla konstrukcji, których całokształt w ujęciu projektowania[23] został przedstawiony na rys. 17.

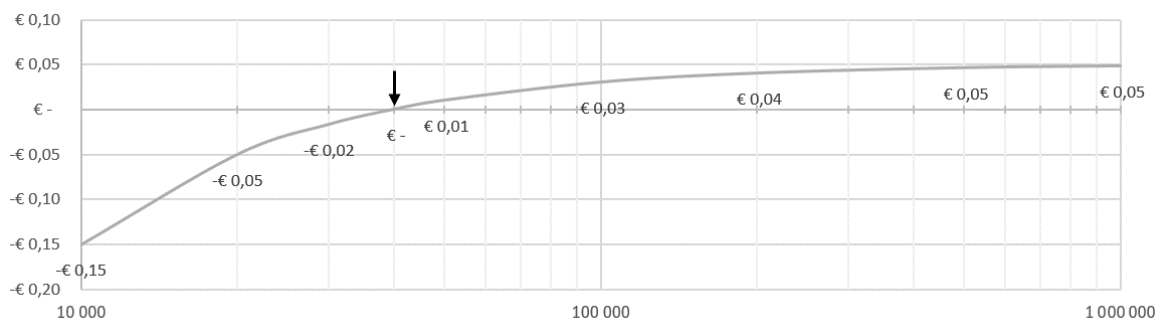


Rys. 17 Schemat postępowania w metodyce DFMA, za źródłem[22]

Najtrudniejszym aspektem stosowania metodyki DFMA przy projektowaniu wyrobów opartych na wypraskach wtryskowych wykonanych z termoplastu jest ocena zmiany kosztu wytworzenia narzędzia wtryskowego w ujęciu zmian konstrukcyjnych elementu wypraski. Ocena wzrostu kosztu narzędzia wtryskowego w scenariuszu integrowania konstrukcyjnego funkcji pierwotnie osobnych elementów złożeniowych produktu wymaga głębokiego zrozumienia procesów projektowania i wytwarzania narzędzi wtryskowych.

Niejednokrotnie koszt integracji dodatkowej funkcji dla zmniejszenia liczby komponentów może przekraczać koszt wytworzenia i integracji osobnego elementu – kluczowym czynnikiem jest perspektywa planowanych wolumenów produkcyjnych, a tym samym: amortyzacji zwiększonego jednorazowego kosztu narzędzia na rzecz kosztu powtarzalnej dla każdego produkowanego elementu osobnej operacji.

Hipotetyczny wpływ takiej różnicy kosztu inwestycyjnego na cenę jednostkową wskutek scenariuszy amortyzacji inwestycji dla różnych ilości planowanej produkcji seryjnej wyrobu został przedstawiony na wykresie widocznym na rys. 18.



Rys. 18 Wykres opłacalności integracji funkcji dwóch elementów wtryskowych w jednym komponencie, z zaznaczonym punktem break-even – scenariusz hipotetyczny

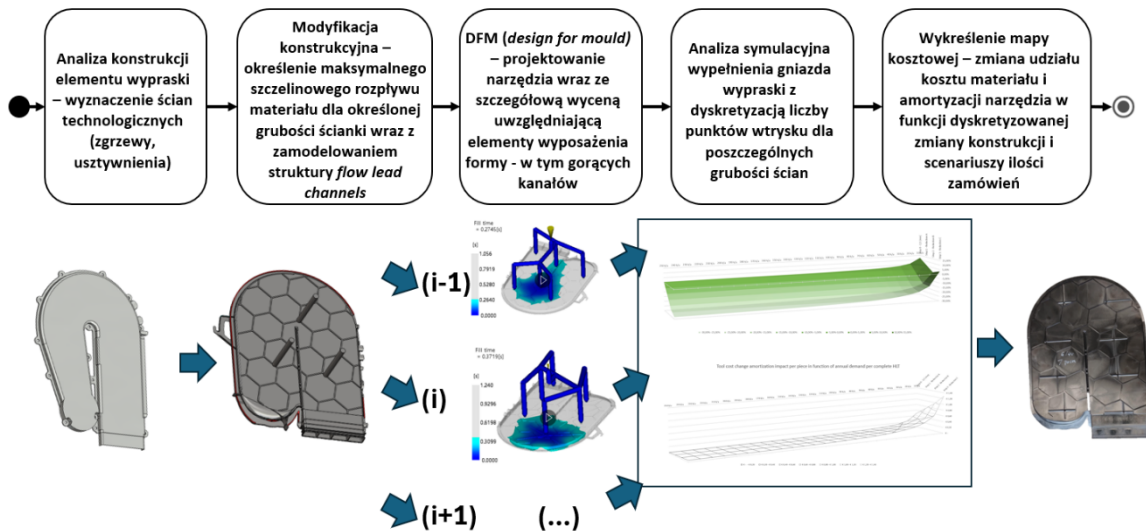
Przedstawiony hipotetyczny scenariusz obrazuje różnicę w cenie wytworzenia produktu dla dwóch wariantów – wariantu A, dwóch prostych narzędzi wtryskowych o łącznym koszcie wytworzenia 65 tys. EUR, gdzie dwa komponenty montowane są w procesie kosztującym 1,05 EUR dla pojedynczego wyrobu; oraz wariantu B, gdzie funkcja obu komponentów realizowana jest przez pojedynczy element wytwarzany wtryskowo skomplikowanym narzędziem o koszcie wytworzenia na poziomie 75 tys. EUR, a wskutek integracji funkcji całkowity koszt montażu wynosi 1,00 EUR.

Pętla optymalizacji kosztu w ujęciu montażu pod kątem liczby komponentów powinna przejść w optymalizację kosztu doboru materiału.

Przykładem analizy korelacyjnej dla minimalizacji kosztu wytwarzania w ujęciu doboru surowca funkcjonalnego może być autorska metoda[26] wykorzystująca utworzenie jednostki cenowej kwantytatywnej funkcji, pozwalająca uprościć współzależność części wsadowych w bilansie optymalizacji kosztu surowca funkcjonalnego.

Mało powszechną, lecz stosowaną praktyką przemysłową może być jednokryterialna wieloczynnikowa optymalizacja konstrukcji dla wytworzenia w ujęciu procesu wtryskowego (DFM) przez minimalizację wymaganej grubości skorupy dla zmniejszenia zużycia materiału kosztem zmian konstrukcyjnych narzędzia. Z uwagi jednak na skokową zmianę parametrów kosztowych generowaną zmianą wyposażenia narzędzi wtryskowych oraz konieczność prowadzenia czasochłonnych symulacji dla wymagającej dyskretyzacji przestrzeni poszukiwań – metodyka ta jest uzasadniona wyłącznie w przypadkach bardzo kosztownych surowców.

Autorski przykład analizy optymalizacji kosztu surowcowego w ujęciu zmian geometrycznych komponentu, zmian geometrii i liczby dysz wtryskowych projektowanego narzędzia wtryskowego w scenariuszach różnych ilości produkcyjnych dla elementu zmywarki wykonanego ze specjalistycznego materiału o podwyższonej odporności cieplnej i wysokim koszcie jednostkowym przedstawiono na schemacie postępowania widocznym na rys. 19.



Rys. 19 Schemat postępowania w rzeczywistym przykładzie optymalizacji kształtu wypraski obudowy komory suszącej dla zmywarki w funkcji ilości zużytego specjalistycznego termoplastu, opracowanie własne

3.1.9 FTO (*freedom-to-operate*) – perspektywa praw własności intelektualnej

Dodatkowym aspektem prac przemysłowych nad rozwojem, optymalizacją oraz industrializacją wyrobu jest określenie prawnej perspektywy – odpowiedzenie na pytanie o to, czy rozważane rozwiązania pozwalające uprościć proces wytwarzania wyrobu nie są chronione prawnie przez patent lub inną formę ochrony przemysłowej.

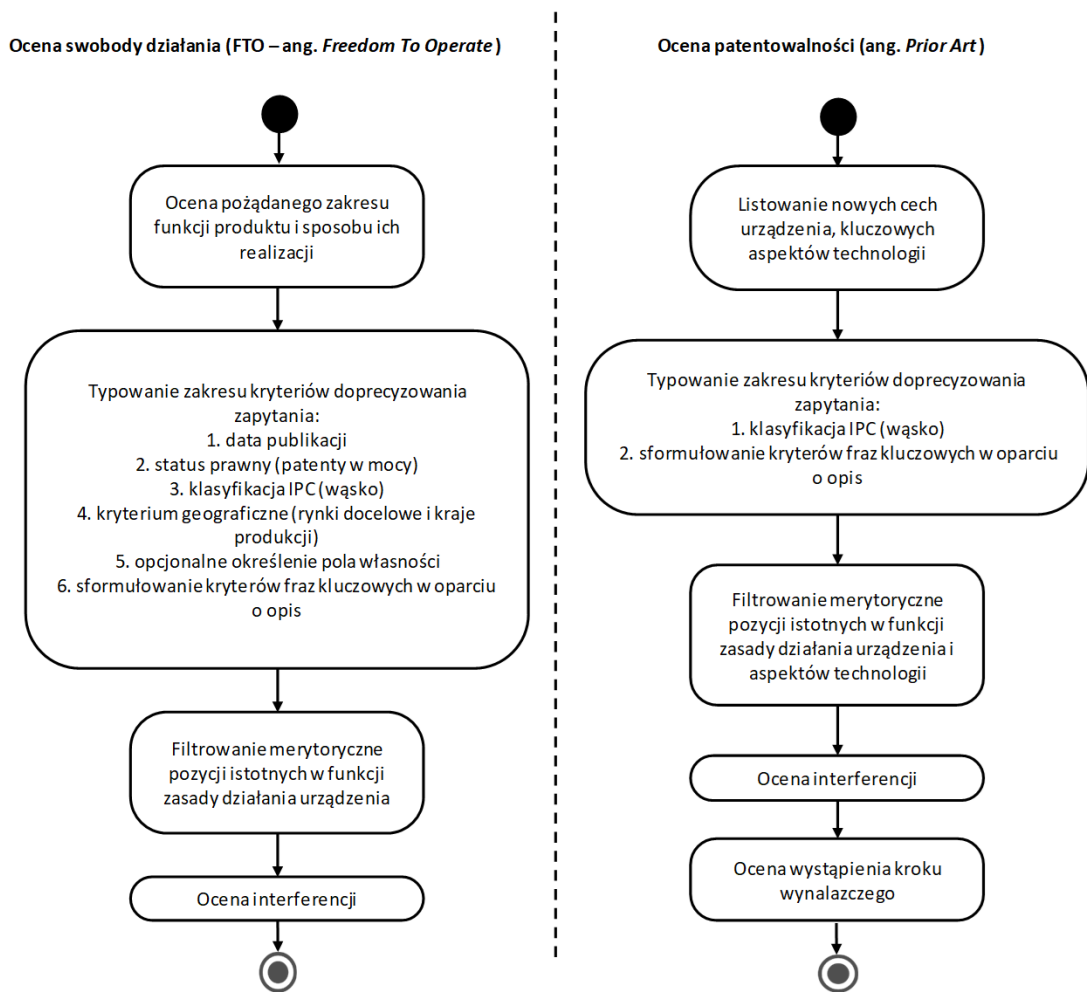
Formalne oświadczenie producenta komponentu o możliwości wykorzystania rozwiązania jest każdorazowo wymagane przed podjęciem decyzji o inwestycji w industrializację produkcji projektowania rozwiązania konstrukcyjnego.

Analiza możliwości wykorzystania rozwiązań w procesie projektowana nazywana jest z języka angielskiego *freedom-to-operate* (FTO) – analizą swobody działania.

Wpływ krajobrazu patentowego na proces projektowania

Proces analizy możliwości prawnych wykorzystania rozwiązania konstrukcyjnego w produkcji różni się od procesu oceny możliwości patentowania wykorzystywanego w produkcji rozwiązania konstrukcyjnego.

Porównanie strumieni procesu oceny swobody działania (FTO) oraz oceny patentowalności (*prior art*) zostało przedstawione na rys. 20.



Rys. 20 Porównanie strumieni procesu oceny swobody działania (FTO) oraz oceny patentowalności rozwiązania technologicznego (prior art), opracowanie własne

Celem oceny krajobrazu patentowego w ujęciu projektowania wyrobu jest określenie, czy inne podmioty prawne nie roszczą sobie ochrony dla określonego rozwiązania. Proces oceny FTO jest pod tym względem prostszy, ponieważ nie wymaga oceny innowacyjności rozwiązania czy oceny całokształtu stanu techniki dla całego świata z uwzględnieniem publikacji naukowych. W ocenie FTO zawęża się obszar przeszukiwania publikowanej informacji o ochronie prawnej rozwiązania do puli patentów będących w mocy na punkt początku planowanej sprzedaży produktu, zawęża się zakres obowiązywania ochrony w funkcji lokalizacji geograficznej planowanego łańcucha produkcji i sprzedaży wyrobu, ponadto zakres różnic konstrukcyjnych rozwiązania dopuszczalnych jako nienaruszających istniejących patentów może być mniejszy niż w przypadku roszczenia kroku wynalazczego.

Na dzień 1 lutego 2024 roku liczba publikowanych rozwiązań patentowych lub wzorów przemysłowych dla obszaru międzynarodowej klasyfikacji patentowej A47L, czyli zmywarek domowych i podległych im urządzeń, wynosi ponad 341 990[27]. Ograniczenie puli do publikacji w ramie czasowej 20 ostatnich lat, zakładając, że zgodnie z prawem po maksymalnie 20 latach następuje przeniesienie prawa ochrony do domeny publicznej, skutkuje zawężeniem puli potencjalnej analizy do 210 130 publikacji. Szczegółowa analiza każdego rozwiązania z takiej zawężonej puli dla biegłego w technice oraz języku prawnym publikacji eksperta przy średnim czasie analizy pojedynczego patentu na poziomie ok. jednej godziny i

ośmiogodzinnym dniu pracy zajęłaby takiemu ekspertowi ponad 105 lat pracy, zakładając oczywiście, że nie przysługują mu przerwy oraz urlop.

Z uwagi na tak szeroki zakres istniejących pozycji ochrony intelektualnej konieczne jest projektowanie strategii przeszukiwania baz patentowych celem zawężenia zakresu potrzebnych analiz prawno-technicznych.

Przykładowy schemat działania dla definiowania wyrażenia logicznego zapytania dla przeszukiwania baz patentowych na przykładzie kryteriów przeszukiwania odpowiednich dla opisywanego rozwiązania przedstawiono na rys. 21.



Rys. 21 Schemat przepływu procesu formułowania zapytania oraz zrzut drzewa query, za espacenet.com na przykładzie opisywanego rozwiązania

Formułowanie zapytań nie jest niestety procesem, w którym ściśle przestrzeganie metodyki każdorazowo zagwarantuje pełne przeszukanie baz. Istnieją różne komercyjne automatyzowane algorytmy analityczne, pozwalające poprawić skuteczność przeszukiwania baz oraz wstępną filtrację rozwiązań, jednak każdorazowo jakość oceny będzie bezpośrednio zależna od doświadczenia i biegłości eksperta w danym polu technicznym i prawnym.

W oparciu o definiowaną strategię zawężenia obszaru poszukiwań generowany jest raport określający pulę pozycji spełniających logiczne działanie na definiowanych kryteriach. W oparciu o otrzymany raport podmiot chcący produkować określone rozwiązanie musi określić, czy wśród znalezionych pozycji nie pojawiają się takie, które mogłyby zostać naruszone przez uruchomienie produkcji konkretnego rozwiązania.

Proces analizy pozycji raportu jest procesem niezautomatyzowanym – konstruktor lub prawnik biegły w analizowanym obszarze technologicznym oraz wykładni prawa patentowego dla analizowanej dziedziny poddaje każdą pozycję ocenie zbieżności cech szczególnych opisu z cechami charakterystycznymi rozważanego rozwiązania konstrukcyjnego. Jeśli dochodzi do interferencji, konieczne jest podjęcie zmian konstrukcyjnych lub rozmów komercyjnych dotyczących licencjonowania prawa do rozwiązania.

Stan techniki dla przykładu wymiany jonowej

W perspektywie zmywek domowych i urządzeń dejonizacyjnych przeszukiwanie publicznych baz patentowych w języku angielskim, obowiązującym dla pozycji międzynarodowej światowej organizacji

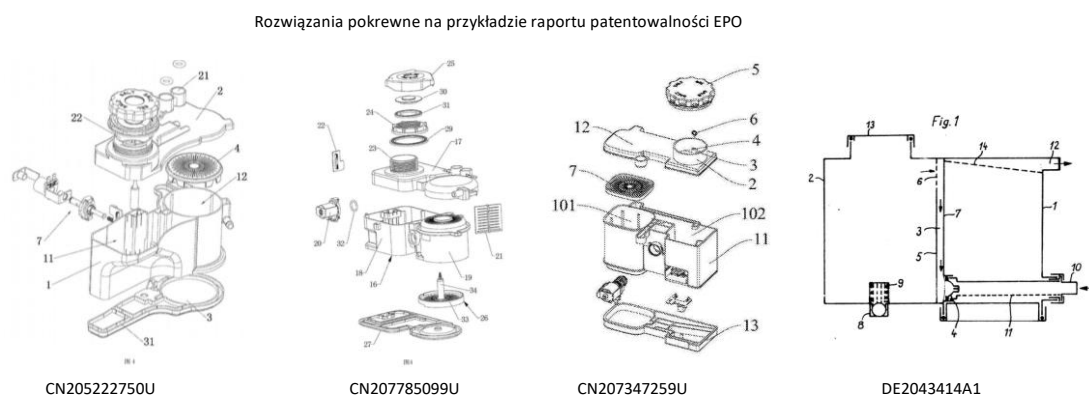
patentowej (WIPO) oraz Europejskiego Urzędu Patentowego (EPO), pokazuje 646 aktywnych pozycji, zawierających alternatywę sformułowania „zmiękczenie” lub „dejonizacja”.

Kryterium oraz zrzut wyniku przeszukania baz wg opisanego zapytania przedstawiono na rys. 22.

Rys. 22 Zapytanie serwisu espacenet.com w obszarze zmiękczenia, query: ipc all "A47L" AND (ctxt all "softening" OR ctxt all "deionization") AND pd > "09.02.2004"

W ujęciu chronionego rozwiązania, dla którego rozważania optymalizacji hydraulicznej są przedmiotem tej rozprawy, nie wszystkie ze znalezionych pozycji będą istotne. Zawężenie przeszukiwanej puli o dodanie wymagania pojawienia się sformułowania „kontrola ciśnienia” lub „kontrola przepływu”, lub „normalizacja” w sformułowaniach cech szczególnych redukuje pulę znalezionych rozwiązań do 36 pozycji – puli, która pozwoliłaby na efektywną analizę szczegółową FTO bez poświęcania wielu lat pracy.

Zestaw rozwiązań konstrukcyjnych wykazanych jako najbardziej zbliżone w wyniku analizy patentowalności przez Europejski Urząd Patentowy (EPO) przedstawiono na rys. 23 poniżej.



Rys. 23 Zestawienie rycin pozycji listowanych jako istotne w analizie stanu techniki EPO dla EP 3962867 A0

3.2 Wymiana jonowa

Projektanci zmywarek zarówno domowych, jak i przemysłowych decydują niemal każdorazowo o wykorzystaniu dodatkowego elementu zmiękczacza, który zwiększa koszt, komplikuje system

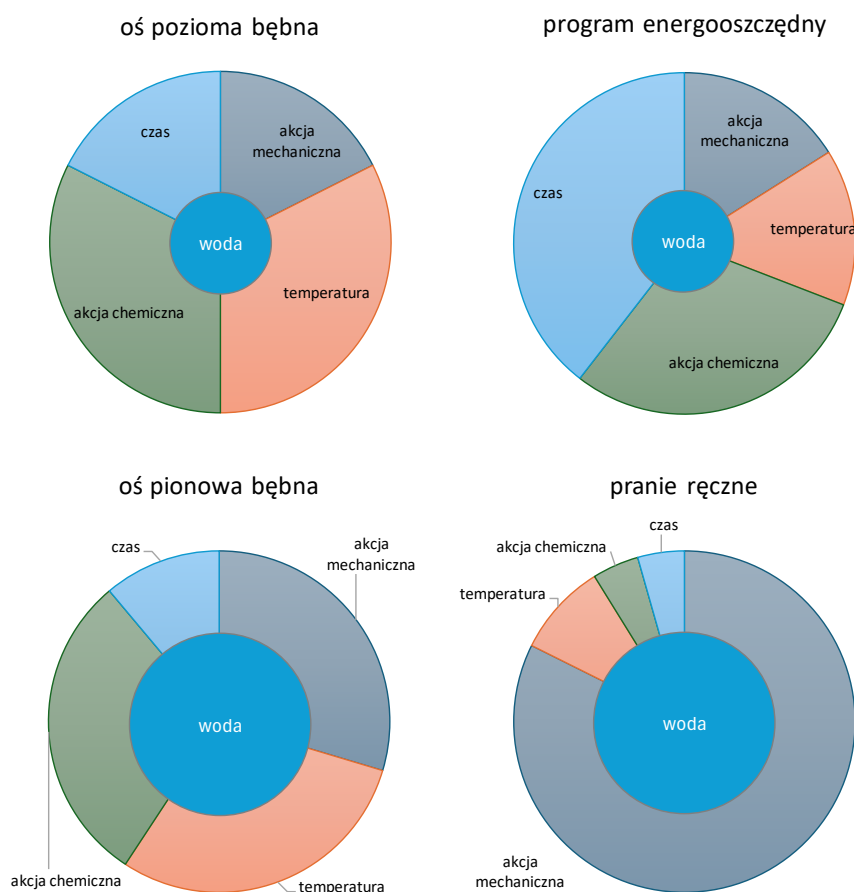
hydrauliczny i tworzy dodatkowe punkty potencjalnej awarii, z uwagi na ogrom korzyści płynących z kontroli poziomu jonów wapniowych i magnezowych w procesie[28].

3.2.1 Twardość wody w ujęciu koła Sinnera

Proces mycia naczyń można definiować jako rozpuszczanie i usuwanie zabrudzeń przylegających do powierzchni czyszczonej przy pomocy medium myjącego.

Już w 1960 roku, na przykładzie pralek automatycznych, dr Herbert Sinner zilustrował udział czterech czynników składających się na skuteczność procesu usuwania zabrudzeń definiowanego w ten sposób[29]. Reprezentacja temperatury, chemii medium myjącego, czasu czyszczenia oraz przekazanej energii mechanicznej w formie wykresu kołowego postulowała, że efekt myjący można każdorazowo odtworzyć, zastępując część jednego czynnika większą ilością przynajmniej jednego innego czynnika, np. zmniejszając temperaturę mycia (prania), można uzyskać porównywalny jakościowo efekt przy zwiększeniu czasu prania i przyłożonej energii mechanicznej.

Koło Sinnera dla przykładu pralek przy różnych scenariuszach prania odzieży zostało przedstawione na rys. 24.



Rys. 24 Koło Sinnera dla czterech wariantów prania odzieży, za cytowaniem[29]

Koło Sinnera, pierwotnie opracowane jako wizualizacja czynników procesu prania odzieży, doskonale oddaje również zależności rządzące jakościowym efektem automatycznego procesu zmywania naczyń.

Jest to istotne w perspektywie kontroli stężenia jonów wapniowych i magnezowych z uwagi na ich krytyczny wpływ na chemię procesu mycia.

W badaniach zaobserwowano, że usuwanie brudu pogarsza się w obecności jonów Ca^{2+} [30]. Podczas gdy można wskazać, że niewielkie ilości jonów Ca^{2+} mogą pozytywnie wpływać na skuteczność czyszczenia poprzez ułatwienie tworzenia miceli przez anionowe środki powierzchniowo czynne detergentu, które mają kluczowe znaczenie dla procesu chemicznego usuwania brudu[31], anionowe cząsteczki środka powierzchniowo czynnego niosą ładunek ujemny po stronie hydrofilowej i mogą być dezaktywowane przez obecność jonów Ca^{2+} [32]. Wreszcie: w obecności jonów twardej wody proces pienienia detergentów również zostanie zakłócony[30].

3.2.2 Twardość wody – wpływ na żywotność urządzeń

Dodatkowym zestawem czynników dotyczących konieczności eliminacji jonów wapniowych i magnezowych z wody procesowej w procesie zmywania jest wpływ osadzania się soli wapniowych i magnezowych w systemach hydraulicznych urządzeń.

Zaobserwowano w wielu badaniach, że wysoka zawartość jonów wapnia i magnezu w wodzie procesowej może prowadzić do awarii elementów hydraulicznych poprzez tworzenie się kamienia[28], co w konsekwencji może skutkować spadkiem efektywności energetycznej procesu zmywania naczyń i utworzeniem warstwy izolacyjnej na powierzchniach grzewczych[33]. Ponadto tworzenie się kamienia wewnątrz zmywarki może stanowić zagrożenie dla higieny, jeśli chropowatość powierzchni zostanie zwiększona przez te osady[34], [35], [36] – zwiększenie chropowatości powierzchni będzie prowadzić do poprawy warunków dla rozwoju mikroorganizmów, szczególnie w przestrzeniach trudno dostępnych wewnątrz układu hydraulicznego.

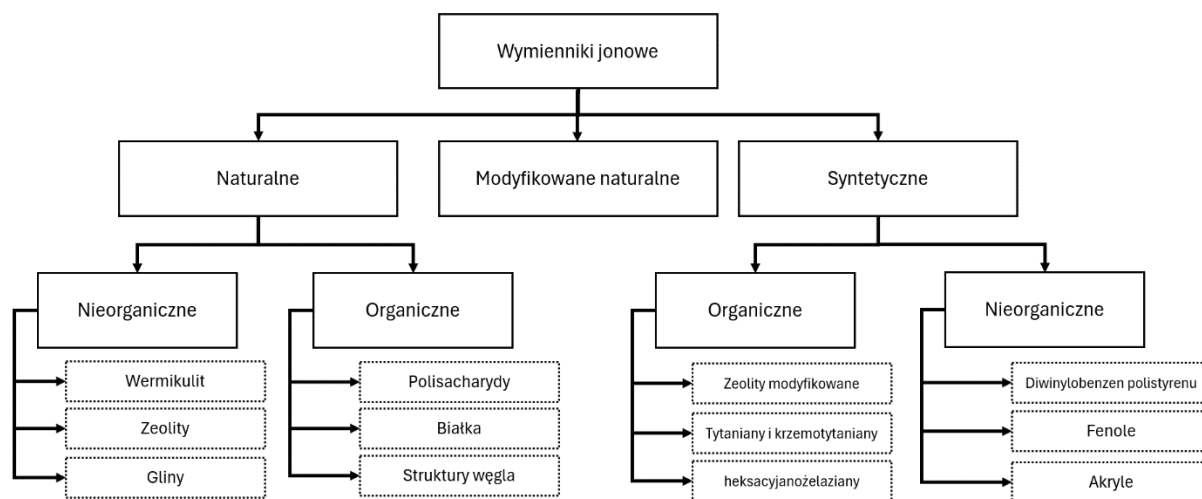
Dodatkową korzyścią płynącą ze sterowania twardością wody, w szczególności w procesie zmywania i prania, jest możliwość dostosowania stężeń jonów dla optymalizacji procesu formowania miceli – struktur kluczowych dla skuteczności penetracji zabrudzeń przez środki powierzchniowo czynne. Optymalizacja formowania miceli będzie pozwalała w ogólnym rozrachunku na obniżenie energochłonności urządzenia przez możliwość obniżenia koniecznej dla uzyskania porównywalnego efektu zmywania temperatury.

3.2.3 Jonity i chemia wymiany jonów

Proces wymiany jonowej odkryto pierwotnie z początkiem wieku XIX. Z kolei na początku wieku XX w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej opracowano procesy syntezy wymienników kationowych o selektywnej chemii wymiany, bazujących na modyfikowanych zeolitach. W roku 1944 opracowano pierwsze żywice wymiany kationowej bazujące na żywicach polistyrenowych zawierających 6–8% cross-linkowanego diwinylobenzenu (DVB), pozwalających na zwielokrotnienie pojemności jonowej swoich poprzedników, analogi dla wymiany anionowej opracowano w roku 1948[37].

Obecnie preparaty wymiany jonowej oferowane są w bardzo szerokiej gamie chemicznej i funkcjonalnej, bazującej w dużej mierze na rozwiązaniach opracowanych w latach 40. XX wieku.

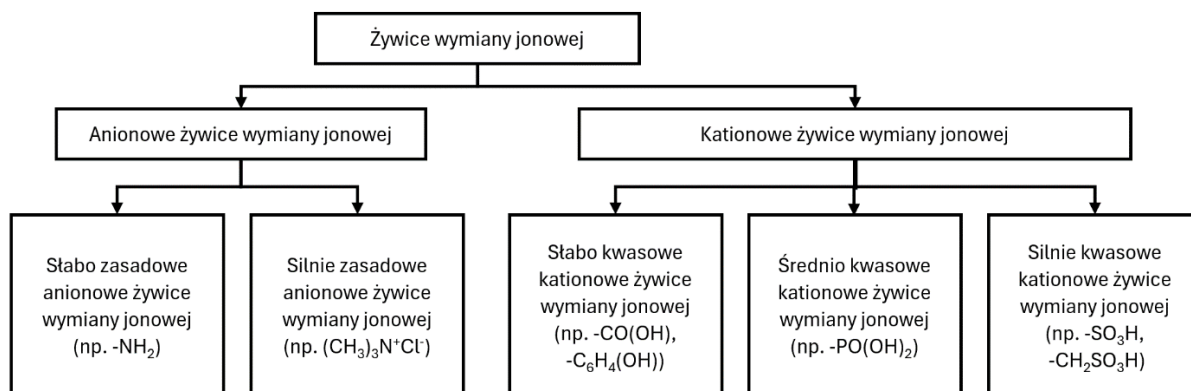
Ogólny podział systematyczny wymienników jonowych w funkcji chemii bazowej został przedstawiony na rys. 25.



Rys. 25 Podział systematyczny[37] wymienników jonowych w funkcji chemii bazowej

Żywicami używanymi powszechnie w przemyśle produkcji komponentów dla urządzeń AGD, w szczególności zmywarek, są silnie kwasowe żywice wymiany kationowej bazujące na matrycy styrenowej cross-linkowanej diwinylobenzenem (CS-DVB).

Drzewo chemicznego podziału żywic jonowymiennych styrenowych CS-DVB[38] przedstawiono na rys. 26.

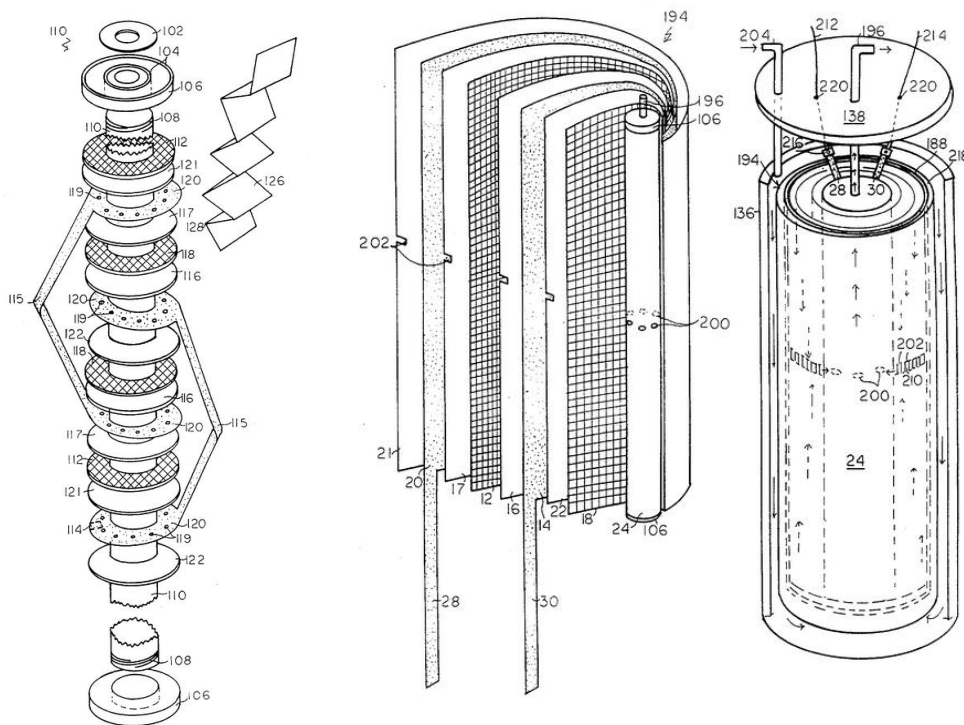


Rys. 26 Podział systematyczny żywic wymiany jonowej opartych na matrycy styrenowej cross-linkowanej DVB[38]

3.2.4 Alternatywne metody wymiany jonowej oraz ich zasada działania

Dostępnych jest wiele badań nad metodami dejonizacji, w tym żywicami jonowymiennymi[39], [40], zeolitami, supermakroporowatymi kriożelami[41] i metodą membran nanofiltracyjnych[42]. Ostatnio przeprowadzono wiele badań nad metodami dejonizacji pojemnościowej[43], [44], [45] z wykorzystaniem kondensatorów przepływowych[46] lub odwróconej osmozy. Według danych metody membranowe są najbardziej popularne w zastosowaniach przemysłowych[47], jednak koszt tych systemów pozostaje wysoki w porównaniu z żywicami jonowymiennymi[48]. Ponieważ stosowanie żywic jonowymiennych jest standardem przemysłowym w systemach zmywania naczyń, rynek oferuje szereg gotowych silnie kwasowych żywic kationowymiennych do eliminacji jonów Ca^{2+} i Mg^{2+} , regenerowanych roztworem NaCl.

Przykład alternatywnej metody dejonizacji wody przez kondensator przepływowy dla urządzeń gospodarstwa domowego wg stanu techniki[49] przedstawiono na rys. 27.



Rys. 27 Rysunki patentu US5547581A – przepływowego kondensatora dejonizującego wodę[50]

3.2.5 Przykładowe warunki pracy jonitów w urządzeniach AGD

Zmienność poziomu zawartości jonów wapnia i magnezu w wodzie wodociągowej w różnych obszarach geograficznych skutkuje mocno zmiennymi warunkami pracy wymienników jonowych.

Zwyczajowo przyjmuje się zakres pracy zmiękczaczy bazujący na przepływie zasilającym oscylującym w granicach 1,5–4 l/min, z najczęściej występującym przepływem na poziomie 2,5 l/min.

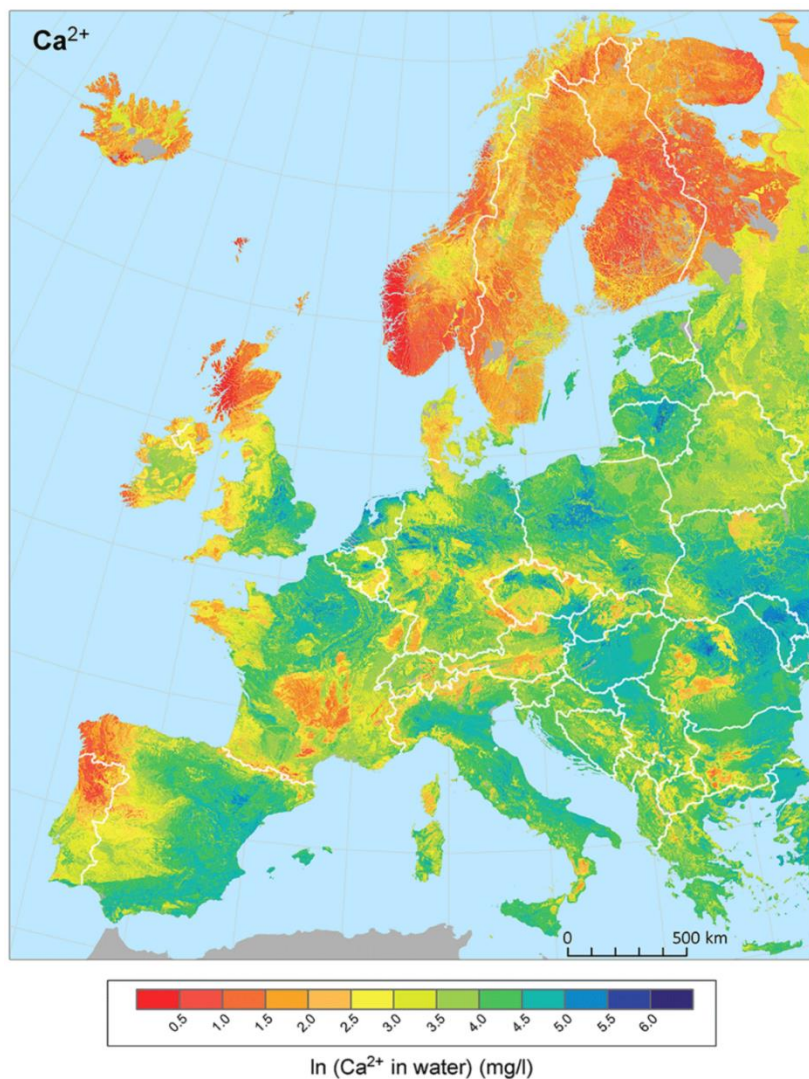
Zawartość wody wyrażona w niemieckich stopniach twardości waha się istotnie, w funkcji geografii. Dla obszarów o bardzo miękkiej wodzie oczekiwana twardość to 3–5°dH, czyli 0–85 mg CaCO₃/dm³. Są to obszary o powierzchniowych źródłach wody przy niskiej zawartości skał wapniowych przy powierzchni – przykład obszarów zasilanych z ZUW Goczałkowice w województwie śląskim pokazuje oczekiwany poziom twardości wody w granicach 3,66–5,26°dH[51].

Dla obszarów wody twardej oczekiwana twardość wody przekracza 20°dH, czyli zawartość jonów wapniowych przekracza 341 mg CaCO₃/dm³. Jako przykład obszaru wody twardej można przytoczyć miasto Gdańsk, gdzie w dzielnicy Brzeźno z ujęcia Zaspą Wodną twardość wody średnia oczekiwana w styczniu 2024 roku została podana na poziomie 20,2°dH, czyli 361 mg CaCO₃/dm³ [52].

Z uwagi na wysoką różnorodność oraz konieczność zachowania zapasu konstrukcyjnego większość producentów przyjmuje wymóg zachowania funkcjonalności wymiennika jonowego w pełnym cyklu zmywania przy zużyciu 10 l wody dla twardości na poziomie przynajmniej 35°dH, jednak wymagania różnią się pomiędzy producentami. Jedną z przyczyn różnorodności wymagań dotyczących sprawności i

pojemności systemów dejonizacji jest różny udział rynkowy producentów w funkcji geografii, narzucającej różnorodność pracy urządzeń w warunkach rzeczywistych wskutek różnic chemicznych wody gruntowej[53].

Wpływ geografii na przewidywany poziom twardości wody użytkowej w ramach kontynentu europejskiego został przedstawiony na mapie kolorystycznej na rys. 28.



Rys. 28 Mapa rozkładu twardości wód przy powierzchniowych na terenie kontynentu europejskiego[53]

3.2.6 Perspektywa kosztowa wykorzystania jonitów w ujęciu przemysłowym

Konieczność wykorzystania żywic jonowymiennych w konstrukcji urządzenia implikuje koszt materiałowy, którego poziom będzie bezpośrednio zależny od efektywności wykorzystania materiału.

W przeciwieństwie do granulatów żywic termoplastycznych żywice jonowymienne nie spełniają funkcji konstrukcyjnych – z uwagi na chemiczny charakter pracy optymalizacja ilości użytego jonitu będzie silnie zależna od warunków wymiany oraz kontroli konstrukcyjnej przepływu.

Idealnym stanem dla wykorzystania surowca jonitowego będzie jednorodny objętościowo przepływ filtracyjny o możliwie niskiej prędkości, pozwalającej na jednorodne zachodzenie procesu wymiany jonowej na powierzchni granulatu w całej jego objętości, aż do wykorzystania pełnej pojemności jonowej

granulatu. Jakikolwiek odstępstwa od jednorodności prędkości objętościowych przepływu generować będą obszary o większej ekspozycji na rozpuszczone w wodzie jony, wpływając tym samym na obszary, dla których wymiana przestanie zachodzić wcześniej, co w rezultacie, pomimo niewykorzystania pełnej użytej pojemności jonowej surowca, nie pozwoli na zachowanie przewidywanej wydajności w pełnym cyklu pracy między regeneracjami solankowymi. W efekcie rozwiązania niepozwalające na jednorodny przepływ w objętości skutkują koniecznością stosowania wyższego zapasu konstrukcyjnego surowca, a tym samym: koniecznością zwiększenia kosztu produkcji.

Homogenizacja przepływu w objętości z założenia będzie prowadzić do poprawy wykorzystania surowca jonitu, a tym samym: do zwiększenia efektywności kosztowej rozwiązania technicznego.

3.3 Mechanika płynów

Mechanika płynów jest obszarem fizyki dotyczącym opisu matematycznego ruchu płynów oraz sił z tego ruchu wynikających.

Opis rzeczywistego zachowania płynów w systemach przepływu będzie każdorazowo wymagał uwzględnienia wewnętrznego tarcia płynu (proporcjonalnego do jej dynamicznego współczynnika lepkości), sił bezwładności (proporcjonalnych do gęstości płynu oraz pól wektorowych prędkości elementarnych), pól skalarnych ciśnienia oraz pól wektorowych sił działających objętościowo (p.. grawitacji)[54].

3.3.1 Opis matematycznych modeli fizycznych zjawisk zachodzących w urządzeniu na przykładzie zmiękczacza

Możliwość numerycznego opisu zjawisk zachodzących wewnątrz urządzenia podczas pracy jest krytyczną częścią każdej optymalizacji konstrukcyjnej. Systematyka optymalizacji parametrów geometrycznych wymaga wszak zdefiniowania kwantyfikowalnych kryteriów optymalizacji oraz ciągłości lub dyskretyzacji argumentów obszaru przeszukiwanych rozwiązań.

W ramach używanego w zmywarkach domowych wymiennika jonowego przepływ zachodzi (z uwzględnieniem możliwości wytworzenia przez wypraski wtryskowe) w modelowanych:

- kanałach komunikacji o polu przekroju zwyczajowo poniżej 100 mm^2 ;
- ścianach szczelinowanych szczelinami o minimalnym wymiarze na poziomie $0,35 \text{ mm}$;
- wewnątrz komór wypełnionych granulatem żywicy jonowymiennej polisferycznej o wymiarze ziaren w zakresie $0,4\text{--}1,5 \text{ mm}$, traktowanej w ujęciu poniższej pracy jako jednorodne złożo porowate.

3.3.2 Reżimy przepływu

Pojęcie reżimu przepływu w mechanice płynów odnosi się do charakterystyki opisu ruchu płynu w rozpatrywanym obszarze oraz do warunków wpływających na dynamikę tego przepływu.

Parametry przepływu, takie jak prędkość strumienia, lepkość płynu, gęstość płynu oraz geometria przestrzeni przepływu, każdorazowo muszą zostać uwzględnione w opisie reżimu.

W perspektywie analitycznego opisu zachowania przepływu reżimy przepływu można analizować w funkcji liczby Reynoldsa, będącej bezwymiarowym współczynnikiem proporcjonalności sił bezwładności do sił wewnętrznego tarcia. Poniżej przedstawiono podstawowy wzór obliczania wartości liczby Reynoldsa na przykładzie dla rury o przekroju kołowym:

$$Re = \frac{w\rho d}{\eta} = \frac{wd}{\vartheta} \quad (1)$$

gdzie

w – średnia prędkość liniowa przepływu $\left[\frac{m}{s}\right]$

ρ – gęstość płynu $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

η – lepkość dynamiczna $[Pa \cdot s]$

$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$ – lepkość kinematyczna $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

μ – dynamiczny współczynnik lepkości lub lepkość cieczy $[-]$

d – średnica przewodu $[m]$

Dla płynu w przybliżeniu nieściśliwego w przepływie jednofazowym zwyczajowo rozpatrujemy zachowanie w ujęciu jednego z trzech reżimów oraz reżimu dla warstw przyściennych:

1. przepływ laminarny – przepływ, w którym pochodna zmiany prędkości liniowej przepływu w funkcji odległości jest funkcją liniową, przy pominięciu efektów przyściennych. W rurach o przekroju kołowym przepływ traktowany jest jako laminarny, gdy wartości liczby Reynoldsa nie przekraczają wartości 2300 $[-]$;
2. przepływ turbulentny, zwany również burzliwym – przepływ, w którym płyn porusza się w sposób nieuporządkowany, tworząc wiry oraz wiry turbulenty. Pochodna funkcji prędkości liniowej przepływu w funkcji odległości od ściany nie będzie funkcją liniową; wraz ze zwiększaniem się liczby Reynoldsa prędkość czoła przepływu w funkcji odległości od ściany będzie asymptotycznie dążyła do jednorodnej wartości. Opis przepływu turbulentnego wiąże się z zachodzeniem nieliniowych efektów w równaniach Naviera–Stokesa, co skutkuje dużą złożonością i koniecznością stosowania technik numerycznych. Przepływ wyłącznie turbulentny jest spodziewany każdorazowo przy liczbie Reynoldsa przekraczającej wartość 5000 $[-]$;
3. przepływ przejściowy – reżim przepływu, w którym przepływ będzie samoistnie przechodził z formy laminarnej do formy turbulentnej i odwrotnie. Reżim ten charakteryzuje się dużą niestabilnością i zmiennością warunków przepływu. Opis matematyczny przepływu jest skomplikowany z uwagi na złożone interakcje pomiędzy czynnikami. Przepływ przejściowy przyjmowany jest dla liczb Reynoldsa w zakresie pomiędzy 2300 $[-]$ a 5000 $[-]$.

Reżim przepływu warstwy przyściennej lub reżim graniczny – jest to reżim obowiązujący dla obszaru bezpośrednio przylegającego do powierzchni ciała, przez które przepływa płyn. Opis matematyczny wymaga uwzględnienia równań opisujących laminarne zachowanie płynu przylegającego do ścian, posiadającego prędkość liniową dążącą do zera. Przykładem takiego równania może być funkcja Blasiusa, zależna od lepkości i gęstości płynu, niepowiązana jednak z liczbą Reynoldsa z uwagi na brak zależności od całościowego wymiaru przewodu.

3.3.3 Matematyczny opis przepływu

Opis analityczny przepływu w układzie kartezjańskim będzie bazował każdorazowo na układzie równań reprezentujących fundamentalne termodynamiczne prawa rządzące mechaniką przepływu[54]:

- równanie ciągłości płynu

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

gdzie

ρ – gęstość płynu $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
 u – prędkość liniowa $\left[\frac{m}{s}\right]$
 t – czas [s]

- równanie zachowania pędu

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

dla

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \quad (4)$$

gdzie

f – siła [N]
 u – prędkość liniowa $\left[\frac{m}{s}\right]$
 τ – naprężenie lepkościowe
 p – ciśnienie [Pa]
 δ – symbolmb Kroneckera [-]

- równania zachowania energii (I prawo termodynamiki)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_p u_j T) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

gdzie

T – temperatura [K]
 c_p – ciepło właściwe $\left[\frac{J}{kgK}\right]$
 β – współczynnik rozszerzalności cieplnej [-]

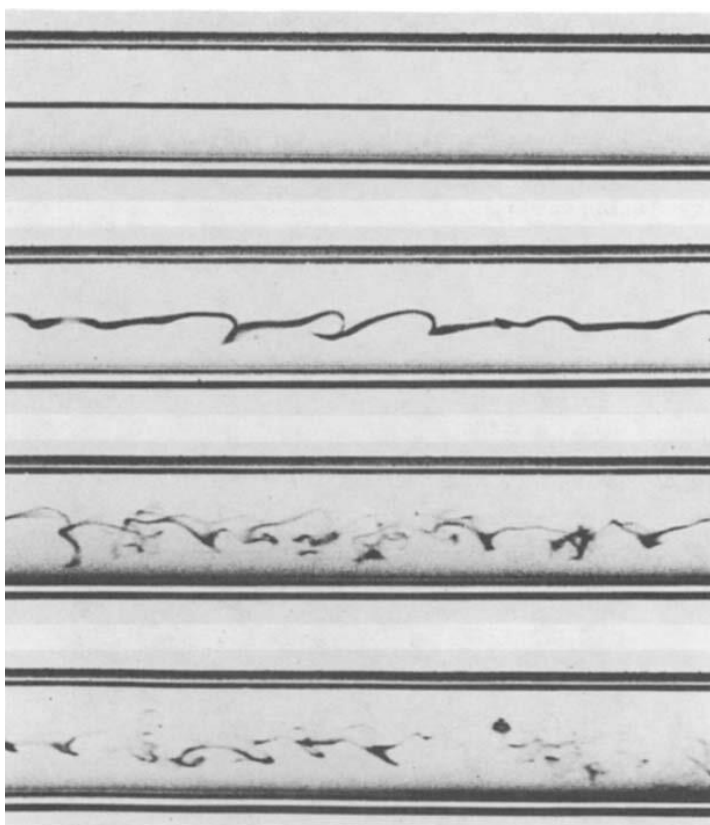
Z uwagi na wykorzystanie w zaprojektowanej metodyce badania systemów symulacyjnych CFD w niniejszej pracy nie będą rozpatrywane analityczne rozwiązania układów równań. Dla obliczeń opartych na numerycznych systemach symulacji komputerowej dobór opisu matematycznego dla rozwiązań dyskretnych odbywa się przez dobór parametrów symulacyjnych dla solwera, opisanych szczegółowo w rozdziale *Metodyka*.

3.3.4 Turbulencje

„Gdy spotkam Boga, zadam mu dwa pytania. Dlaczego (istnieje) relatywistyka i dlaczego (istnieje) turbulencja? Szczerze wierzę, że będzie miał odpowiedź tylko na pierwsze z nich” – to znany cytat[55] noblisty Wernera Heisenberga, odnoszący się do nastawienia wielu fizyków do zjawiska turbulencji.

Zachowania turbulentne w przepływie płynu rzeczywistego dla warunków konstrukcyjnych urządzeń gospodarstwa domowego, niezależnie od oceny matematycznej reżimu przepływu, są nieuniknione – sama obecność niedoskonałości produkcyjnych powierzchni kanałów przepływowych, krawędzi, zmian kierunku przepływu, uskoków będzie powodować gwałtowne lokalne zmiany ciśnienia, skutkujące tworzeniem lokalnych obszarów ruchu nielaminarnego nawet w konstrukcjach projektowanych z założeniem zachowania przepływu laminarnego.

Wizualizacja przekroju linii prędkości w przepływie za metodą eksperymentalną Reynoldsa[56] z 1860 roku została przedstawiona na rys. 29.



Rys. 29 Wizualizacja przekroju linii prędkości lokalnych, za metodą eksperymentalną Reynoldsa[56], z góry do dołu – od najmniejszej wartości Re do największej wartości Re

Cechami charakterystycznymi wynikającymi z turbulencji przepływu jest powstawanie wirujących struktur wewnątrz płynu, skutkujących wewnętrznym przemieszaniem płynu, wewnętrzną turbulentną dyssypacją energii oraz wysoka nieliniowość skutków lokalnych turbulencji.

Podczas gdy zjawisko przemieszania płynu może być korzystne dla systemów wymiany ciepła przez wymuszenie skuteczniejszej dystrybucji ciepła wewnątrz płynu, aniżeli wynikałaby z cech przewodności cieplnej płynu lub dla systemów rozprowadzających dodawane substancje w objętości cieczy przez zwiększenie aktywnej powierzchni dyfuzji, z perspektywy mechaniki przepływu turbulencja jest źródłem strat energii mechanicznej przepływu na rzecz zwiększenia energii termicznej.

Ponadto nieprzewidywalność zachowania przepływu turbulentnego oznacza, że projektowanie systemów bazujących na transformacji energii kinetycznej w energię potencjalną ciśnienia, jak na przykład regulacyjnie wymagane przerwy powietrzne systemów zasilania wodnego urządzeń gospodarstwa domowego, wymaga szczególnej uwagi poświęconej materiałom i technikom wytwarzania elementów kształtujących przepływy.

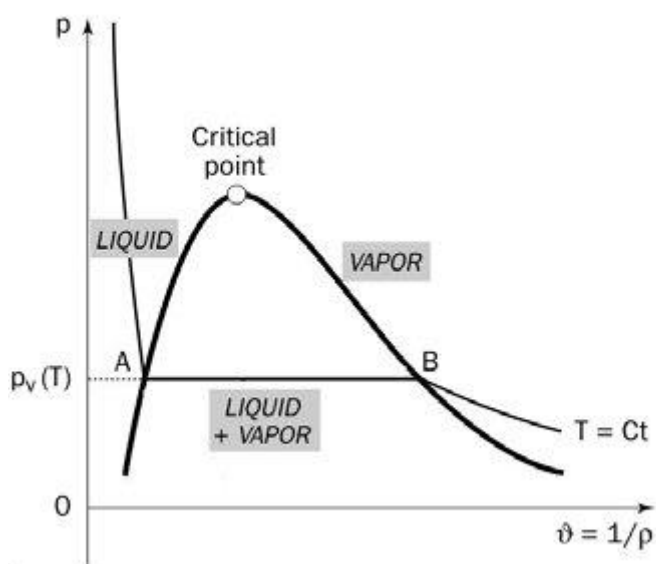
W perspektywie wymienników jonowych z uwagi na bardzo niskie wartości liniowych prędkości przepływu wymaganych dla skutecznego prowadzenia wymiany jonowej przez żywicę jonowymienną efekty turbulentne mogą zostać wykorzystane konstrukcyjnie niemal wyłącznie jako sposób na ujednolicenie pola tensorowego ciśnienia przepływu na granicach złoża jonitowego.

Z uwagi na charakter analizowanych przepływów w niniejszej pracy, to jest pól wektorowych prędkości przepływu liniowego wewnątrz jonitu, w którym efekty bezwładnościowe płynu z uwagi na duży wpływ lepkości przy niskich przekrojach elementarnych kanałów przepływu oraz niskie wartości prędkości liniowych przyjmują wartości pomijalne[57], [58] w ujęciu opisu Darcy'ego, efekty turbulentne w ujęciu analitycznym zostały pominięte w rozważaniach.

3.3.5 Kawitacja

Kawitacja jako zjawisko w przepływie cieczy dotyczy pojawienia się w przepływie jednofazowym dodatkowego składnika fazy gazowej, wywołanego lokalnymi zmianami ciśnienia wynikającymi z lokalnych zjawisk w przepływie – jest to zjawisko niemal izotermicznej przemiany fazy cieczy w gaz wskutek lokalnego obniżenia punktu wrzenia[59] lub wytrącenia gazu rozpuszczonego w cieczy wskutek lokalnej zmiany rozpuszczalności gazu w cieczy spowodowanej zmianą ciśnienia[60].

Wykres zmiany fazy w procesie izotermicznej kawitacji[61] został przedstawiony na rys. 30.



Rys. 30 Wykres zmiany fazy w procesie izotermicznej kawitacji[61]

Występowanie zjawiska kawitacji jest szeroko opisane w literaturze fachowej – pierwsze wzmianki o jego występowaniu pojawiają się w jednym z traktatów Isaaka Newtona[62], w którym opisano pojawienie się pęcherzyka zaburzającego zjawiska optyczne w obserwowanym układzie ruchomym optyki soczewki i płyty[63]. Współcześnie zjawisko jest szeroko opisane w literaturze fachowej mechaniki płynów,

termodynamiki oraz inżynierii, w głównej mierze z uwagi na istotny wpływ jego występowania na warunki rzeczywiste pracy systemów.

Z uwagi na ekstremalne warunki kolapsu pęcherzyków o krótkim czasie życia zjawisko kawitacji może prowadzić do lokalnego mikroskopowego występowania temperatur dochodzących do 10 000 K, prowadzących do podniesienia temperatur materiału otaczającego punkt zapadnięcia o nawet 500 K, wywołania wewnętrznych udarów ciśnienia mikroskopijnej skali, w dłuższej perspektywie prowadząc do przyspieszonej degeneracji materiału pracującego w opisanych warunkach[60].

W skali makro przykładami negatywnego wpływu zjawiska kawitacji na urządzenia mogą być:

- spadek nośności i wzrost oporu aerodynamicznego skrzydeł pojazdów supersonicznych;
- przyspieszenie erozji powierzchniowej śrub wirników łodzi, łopatek sprężarek;
- występowanie hałasu wysokich częstotliwości spowodowanych zapadaniem się pęcherzyków;
- występowanie hałasu niskich częstotliwości lub wibracji spowodowanych występowaniem obniżonej gęstości przestrzeni pęcherzyków w medium.

W perspektywie rozważanej w ramach niniejszej rozprawy konstrukcji, z uwagi na relatywnie niskie prędkości przepływu cieczy w konstrukcji, niski udział faz gazowych w medium oraz brak elementów ruchomych układu zjawiska kawitacji nie będą rozpatrywane jako czynnik.

3.3.6 Przepływy w ciałach porowatych – przepływy filtracyjne na przykładzie opisów stosowanych w przemyśle naftowym

Opis numeryczny zjawisk powiązanych z przepływem jednofazowym zwyczajowo oparty jest na układzie równania zachowania ciągłości, pędu i energii. Opis taki może ulec uproszczeniu, jeśli opisywany przepływ jest przepływem przez ciało porowate, gdzie wymiary elementarnych kanałów przepływu stają się istotnie nieduże[57]. Opis matematyczny zachowania płynu w takim środowisku przepływu zwyczajowo sprowadza się do układu równań ciągłości płynu oraz prawa Darcy'ego[64], alternatywnie równania Richardsa w przypadku przepływów wielofazowych[57].

Dziedzina modelowania numerycznego przepływów w ciałach porowatych jest tematem szeroko zbadanym, o którym pierwsze badania prowadzące do opisu zjawisk publikowane były już w wieku XIX[65]. Współczesne badania dotyczące opisu zjawisk jednoznacznie wskazują na krytyczny wpływ pól rozkładu ciśnienia wewnątrz ciała porowatego jako czynnika kształtującego przepływ[58], [66], [67], [68].

Z perspektywy rozpatrywanego przypadku konstrukcyjnego analitycznie rozpatrywany aspekt przepływu w ciałach porowatych jest istotny z perspektywy badania empirycznego zachowania wykorzystanych w rozwiązaniu preparatów wymiany jonowej.

Opis przepływów filtracyjnych wg Darcy'ego oparty został na badaniach nad filtracją cieczy przez porowate materiały na przykładzie analizy przypadku dla fontann miejskich w Paryżu[65] z 1856 roku. Główna zasada tego opisu zakłada, że przepływ cieczy przez te materiały porowate jest proporcjonalny do różnicy ciśnień między dwoma punktami oraz odwrotnie proporcjonalny do oporu, jaki te materiały stawiają przepływającemu płynowi. Darcy eksperymentalnie potwierdził tę zależność w swoich badaniach nad przepływem wody przez warstwy piasku.

W ujęciu skalarnym, opisującym jednowymiarowy przepływ w ośrodku porowatym, prawo Darcy'ego stanowi, że prędkość filtracji płynu jest wprost proporcjonalna do spadku ciśnienia przypadającego na

jednostkę długości ośrodka i odwrotnie proporcjonalny do lepkości opisywanego płynu. Parametrem opisującym charakterystykę złoża jest natomiast parametr tzw. przepuszczalności, charakterystyczny dla danego ośrodka.

Opis ten jest kluczowy zarówno dla zrozumienia naturalnych procesów hydrologicznych, jak i dla inżynierii, zwłaszcza przy projektowaniu systemów filtracyjnych. Przykłady zastosowań prawa Darcy'ego można znaleźć w różnych dziedzinach: od rolnictwa przez geologię po budownictwo.

3.4 Modelowanie numeryczne CFD (*computational flow dynamics*)

Modelowanie numeryczne przepływów (CFD – z ang. *computational flow dynamics*) jest obszarem na granicy nauk komputerowych, analizy matematycznej i mechaniki płynów, klasyfikowanym jako gałąź fizyki obliczeniowej wykorzystująca analizę numeryczną oraz siatki modeli komputerowych dla przybliżenia rzeczywistych zachowań płynów w założonych warunkach brzegowych poprzez dyskretyzację opisu numerycznego dla badanej geometrii[69].

Zasada działania metod obliczeniowych CFD sprowadza się do wykonania wielokrotnie przeprowadzonej serii obliczeń dla równań zachowania energii i równań ciągłości płynu dla skończonego przybliżenia elementarnych objętości opartych na domenie obliczeniowej w postaci komórek siatki modelu komputerowego. Kolejne pętle obliczenia jako warunki szczegółowe dla kolejnych komórek przyjmują wyniki obliczeniowe poprzedniej pętli kalkulacyjnej, z każdą pętlą zmniejszając różnice wyniku pomiędzy nimi. Różnice wyników między pętlami mogą stanowić podstawę do określenia, w którym momencie można przerwać powtarzanie pętli obliczeniowych. Stan, w którym wartości przyjętych parametrów różnic spełniają określone przez użytkownika warunki, określany jest stanem konwergencji.

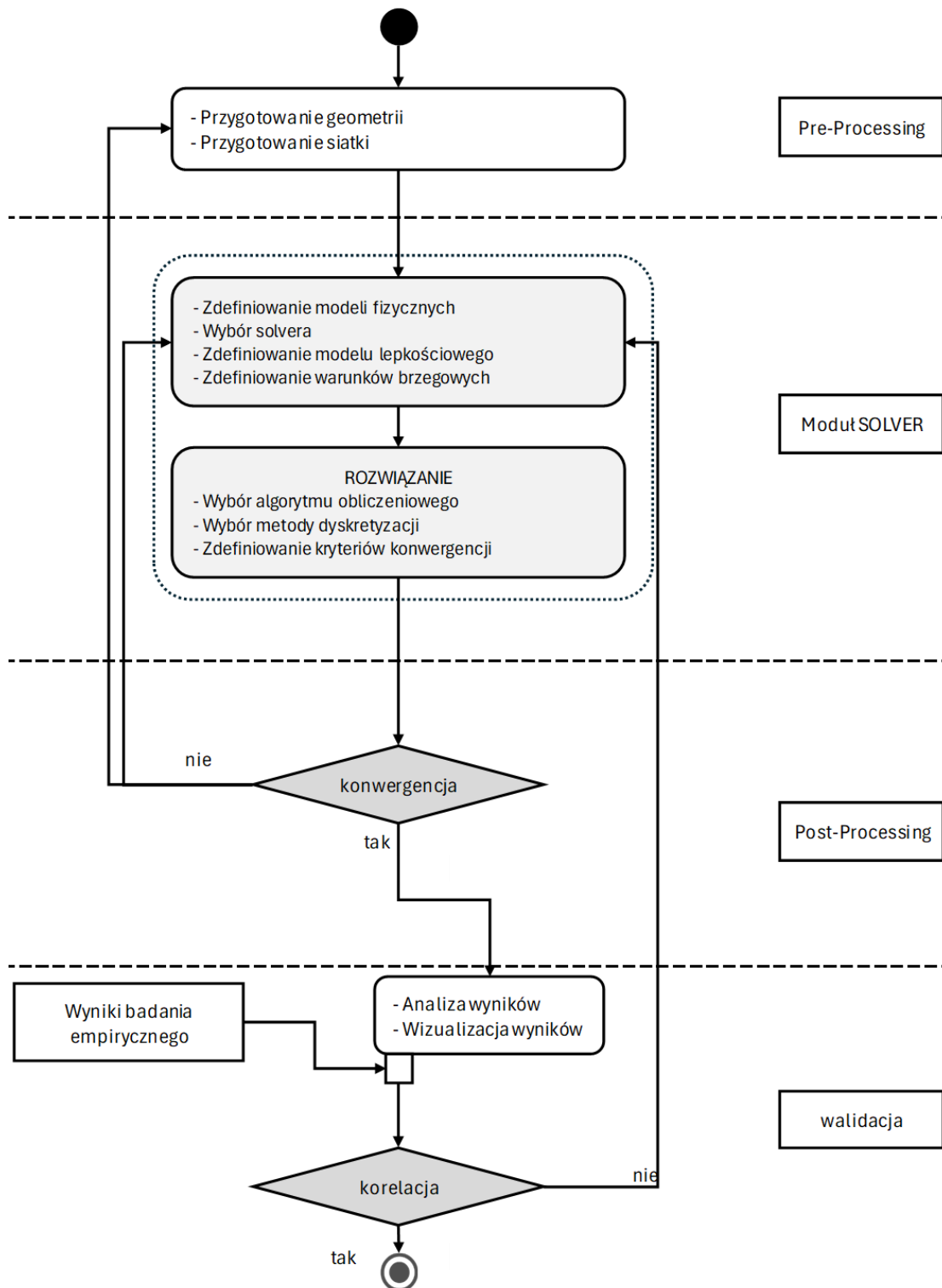
Obliczenia mogą być wykonywane dla stanu ustalonego lub dla stanu nieustalonego[70], a w zależności od rozpatrywanych warunków pracy rzeczywistej analogii dla symulacji dobrany może być szeroki zakres szczegółowych równań opisujących zachowanie płynu.

Do opisu zachowania płynu mogą być wykorzystane przykładowo równania Naviera–Stokesa dla płynu ściśliwego w połączeniu z modelem Fourierowskim przepływu ciepła oraz równaniem stanu dla przypadków, w których zmiana gęstości płynu jest istotna z fizycznego punktu widzenia[71], równania Naviera–Stokesa dla płynu nieściśliwego w tandemie z równaniami zachowania energii, dla przypadków przepływów niskich prędkości i pomijalnych różnic temperatury w płynie[71]. Możliwe jest wykorzystanie również szeregu innych równań w zależności od przypadku symulowanego, np. równania Eulera dla płynu ściśliwego, równania Boussinesqa, równania Naviera–Stokesa przy uśrednionej liczbie Reynoldsa (RANS – z ang. *Reynolds–Averaged–Navier–Stokes*), równań przepływu idealnego, równań fali akustycznej, równań warstwy przyściennej i innych[72].

Krytyczną z perspektywy doboru modeli numerycznych dla prowadzenia analizy przepływów CFD jest moc obliczeniowa potrzebna dla wykonania obliczeń. Uproszczenia modeli numerycznych lub uproszczone modele numeryczne, jak np. szczególnie popularny typ modelu RANS, niejednokrotnie nie wpływają istotnie na cechy symulowane modeli – kluczowa z perspektywy badacza jest znajomość zachodzących zjawisk oraz dostępnych metod obliczeniowych dla doboru modelu, który pozwoli na osiągnięcie replikacji zachowania rzeczywistego badanych parametrów przy możliwie niskim nakładzie mocy obliczeniowej, a tym samym: przy możliwie niskim koszcie wykonania symulacji[73].

Powszechnie stosowanym w stanie techniki i wiedzy sposobem na weryfikację poprawności skonfigurowania modelu obliczeniowego jest porównanie wyników symulacyjnych z odpowiednio zaprojektowanym badaniem empirycznym w oparciu o prototyp badawczy i wytypowany przynajmniej jeden mierzalny parametr fizyczny przepływu[74], [75], [76], [77], [78], [79], [80].

Przykładowa strategia opracowania modelu CFD wraz z walidacją empiryczną[81] została przedstawiona na schemacie poniżej (rys. 31).

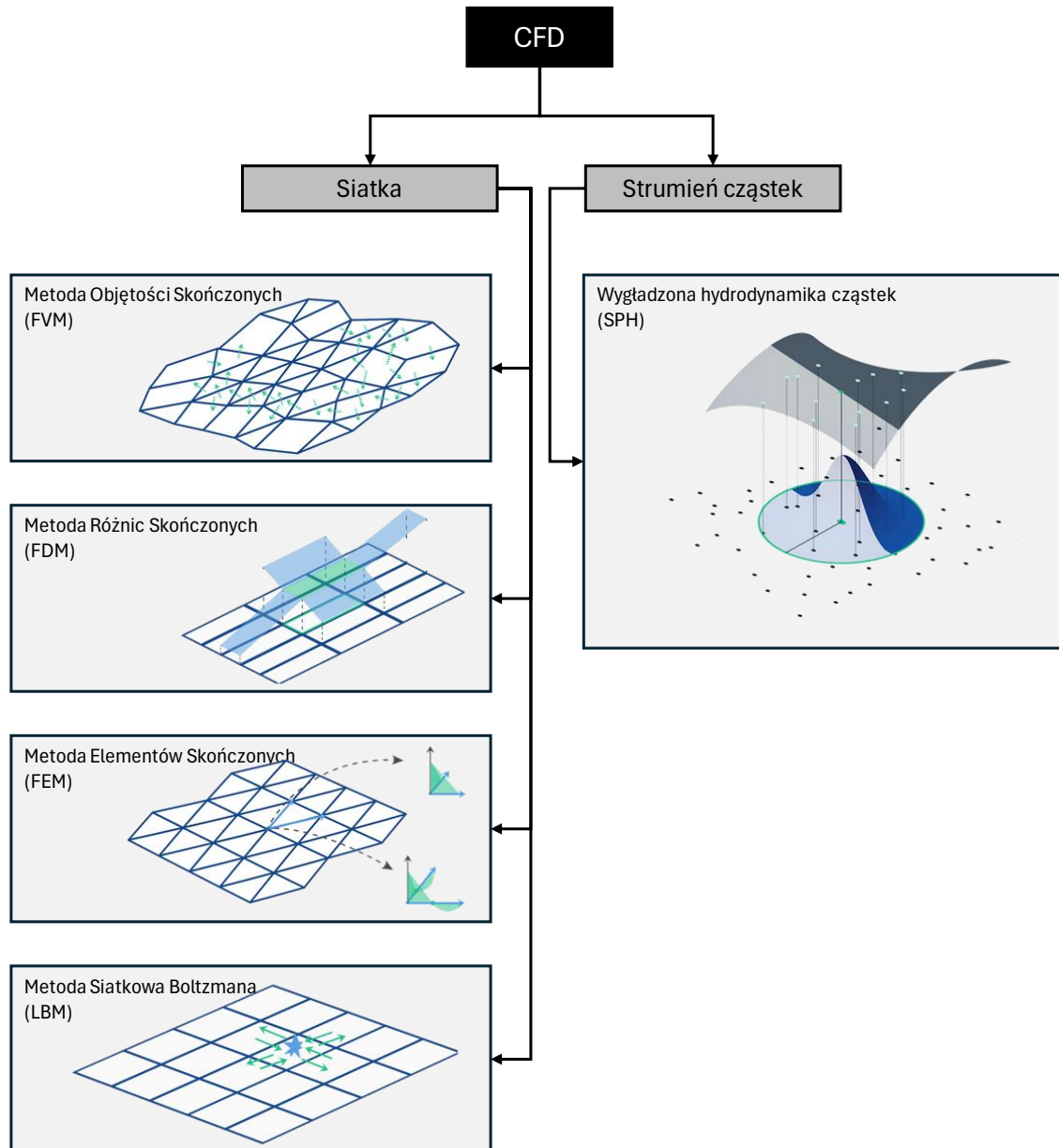


Rys. 31 Przykładowa strategia opracowania modelu CFD wraz z walidacją empiryczną, za źródłem[81]

3.4.1 Podział modeli numerycznych CFD

Modele numeryczne symulacji przepływów dzielą się na wiele typów w funkcji strategii podziału domeny obliczeniowej na komórki[82].

Podział modeli[82] w funkcji strategii podziału bryły został przedstawiony na rys. 32.



Rys. 32 Drzewo podziału typów modeli numerycznych dla komputerowych obliczeń symulacyjnych przepływu

Pierwsza z przedstawionych metod, metoda FVM (metoda objętości skończonych – z ang. *finite volume method*) opiera się na podziale przestrzeni na komórki kontrolne, w których są rozwiązywane równania fizyczne opisujące przepływ. Jest to popularna technika w dynamice płynów, która dokładnie uwzględnia zachowanie objętości i zasady zachowania masy, energii oraz pędu. Jedną z zalet FVM jest możliwość uwzględnienia złożonych warunków brzegowych oraz różnorodnych materiałów, co sprawia, że jest ona wykorzystywana w różnych dziedzinach inżynierii. Jednakże jej zastosowanie może być kosztowne obliczeniowo, zwłaszcza dla trójwymiarowych symulacji o dużych rozmiarach siatki.

Pierwszą alternatywną metodą jest metoda FDM (metoda różnic skończonych – z ang. *finite difference method*), która polega na dyskretyzacji przestrzeni za pomocą siatki, gdzie pochodne przepływu są przybliżane różnicami skończonymi. Jest to popularna i stosunkowo prosta technika, która znajduje zastosowanie w szerokim zakresie dziedzin nauki i inżynierii. Zaletami FDM są łatwość implementacji i efektywność numeryczna, jednak może być nieprecyzyjna dla nieregularnych siatek oraz może wymagać dużych ilości pamięci komputerów obliczeniowych dla dokładnych wyników.

Kolejna: metoda FEM (metoda elementów skończonych – z ang. *finite element method*) opiera się na przybliżaniu domeny przepływu za pomocą elementów skończonych, co umożliwia elastyczne modelowanie różnych geometrii. Jest szeroko stosowana w analizie strukturalnej, inżynierii mechanicznej oraz dynamice płynów. Jedną z głównych zalet FEM jest możliwość uwzględnienia złożonych warunków brzegowych oraz nieliniowych zjawisk, ale jej wady obejmują konieczność przeprowadzenia dużej liczby obliczeń oraz czasochłonność implementacji dla skomplikowanych modeli.

Metoda LBM (metoda siatkowa Boltzmann – z ang. *lattice Boltzmann method*) – metoda, w której gęstość oraz prędkość przepływu są rozwiązywane przez ewolucję gęstości funkcji dystrybucji[83], [84]; symuluje przepływ na siatce dyskretnej poprzez propagację funkcji rozkładu cząstek. Jest to stosunkowo nowa metoda, która znajduje zastosowanie w modelowaniu złożonych zjawisk, takich jak przepływy wielofazowe i zjawiska turbulencje. Jedną z zalet LBM jest elastyczność w modelowaniu różnorodnych geometrii oraz zdolność do równoległego przetwarzania, ale może być wolniejsza niż inne metody dla niektórych problemów.

Metoda SPH (wygładzona hydrodynamika cząstek – z ang. *smoothed particle hydrodynamics*): opiera się na aproksymacji płynu jako zestawu cząstek, co umożliwia elastyczne modelowanie złożonych przepływów. Jest szczególnie popularna w symulacjach zjawisk płynowych, takich jak eksplozje i kolizje ciał stałych. Jedną z zalet SPH jest brak potrzeby siatki, co ułatwia modelowanie nieregularnych geometrii, ale może wymagać dużej liczby cząstek dla oddania rzeczywistych zachowań i może być kosztowna obliczeniowo dla dużych symulowanych systemów.

3.4.2 Perspektywa przemysłowa – wykorzystanie CFD w perspektywie Computer Assisted Design (CAD)

Oprogramowanie symulacyjne wykorzystywane jest w procesach inżynierskich w głównej mierze z uwagi na możliwość skrócenia i obniżenia kosztu procesu iteracyjnego w projektowaniu konstrukcji. Stan wiedzy pokazuje bardzo szerokie wykorzystanie tego typu symulacji w przemyśle: spożywczym[85], energetycznym[86], [87], motoryzacyjnym[88], naftowym[89], lotniczym[90], w produkcji wielkoseryjnej[13], [91], [92], [93].

Wczesna faza rozwoju produktów dla produkcji wielkoseryjnej, wiążąc się z częstymi zmianami założeń konstrukcyjnych, może skutkować niechęcią do wdrażania szczegółowych modeli CFD jako narzędzia iteracyjnego z uwagi na potencjalnie wysoki koszt pracy[94] dla dostosowywania wielu często zmienianych wersji konstrukcji do analizy symulacyjnej.

Z uwagi na różny poziom złożoności modeli numerycznych oraz możliwości oferowanych przez różne pakiety oprogramowania praktykowanym rozwiązaniem dla wczesnych etapów iteracji konstrukcyjnych jest stosowanie uproszczonych modułów oprogramowania symulacyjnego integrowanych w natywnym środowisku projektowym CAD.

4 Metodyka

4.1 Opis badanego rozwiązania technologicznego w ujęciu IPR

Badane rozwiązanie technologiczne jest urządzeniem wymiany jonowej w cylindrycznej komorze wypełnionej jonitem komercyjnym typu diwinylobenzenu cross-linkowanego, w którym przepływ, w funkcji ograniczeń wynikających z technologii wytwarzania wielkoseryjnego, zasilany jest odformowanym wtryskowo sitem radialnym u spodu cylindra, a odbiór płynu realizowany jest przez odformowane wtryskowo sito o kształcie wycinka torusa oraz koncentryczny względem ścian cylindra kanał pasywnego obniżenia ciśnienia. Celem kanału jest umożliwienie ucieczki części płynu z obszaru o objętościowo najniższej ilości przepływu, dla poprawy parametru jednorodności przepływu w objętości jonitu, co pozwoli na całościowe zwiększenie wykorzystanej pojemności jonowej użytego surowca.

4.2 Opis problemu badawczego

Problemem badawczym jest brak dostępnej w stanie wiedzy efektywnej metody projektowania wymiaru kanału regulacji ciśnienia dla maksymalizacji wykorzystania pojemności jonowej surowca jonitu przy wykorzystaniu konstrukcyjnym rozwiązaniu patentowego PCT/CN2020/083801[95]

4.3 Opis warunków brzegowych dla badania

W ramach badania rozważany był przypadek pojemnika wymiany jonowej zmiękczacza dla zmywarki domowej, zaprojektowanego zgodnie z autorskim zgłoszeniem patentowym, pracującego w warunkach odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy w zmywarce.

4.3.1 Ograniczenia technologiczne wytwarzania

Przyjęte ograniczenia technologiczne wytwarzania dotyczą warunków brzegowych dla geometrii pojemnika na jonit, który dla zachowania efektywności kosztowej wytworzenia powinien być wykonany z maksymalnie trzech oddzielnych wyprasek wtryskowych połączonych w ramach procesu specjalnego zgrzewania gorącą płytą.

Z uwagi na planowane wdrożenie opracowanego rozwiązania do produkcji seryjnej istotne było umożliwienie wykonania geometrii przy zachowaniu grubości ścianek modelu cienkościennego w zakresie 1,2–1,8 mm, jak i umożliwienie zastosowania w geometrii modelu kątów odformowania pozwalających na uwolnienie wypraski z narzędzia wtryskowego poprzez unikanie geometrii o kącie ujemnym względem potencjalnych linii podziału form wtryskowych.

4.3.2 Ograniczenia kosztowe surowca

Z uwagi na istotne różnice kosztowe pomiędzy surowcem jonitu, dla którego prowadzona była optymalizacja homogeniczności przepływu jako pośredni wyznacznik wykorzystania pojemności jonowej surowca, kryterium optymalizacyjne nie dotyczyło ilości wykorzystanego do wykonania pojemnika termoplastu.

Ponadto z uwagi na cząstkowy charakter odwzorowania geometrii optymalizowanego zbiornika, tj. zawężenie rozważań jedynie do części elementu zmiękczacza wody dla zmywarek odpowiedzialnej za podtrzymanie żywicy jonowymiennej optymalizacja ilości użytego materiału nie wykazywała potencjału dla istotnego zmniejszenia kosztu wytworzenia poprzez redukcję ilości termoplastu.

4.3.3 Przyjęte założenia korelacji

Na potrzeby badania przyjęto następujący zestaw założeń:

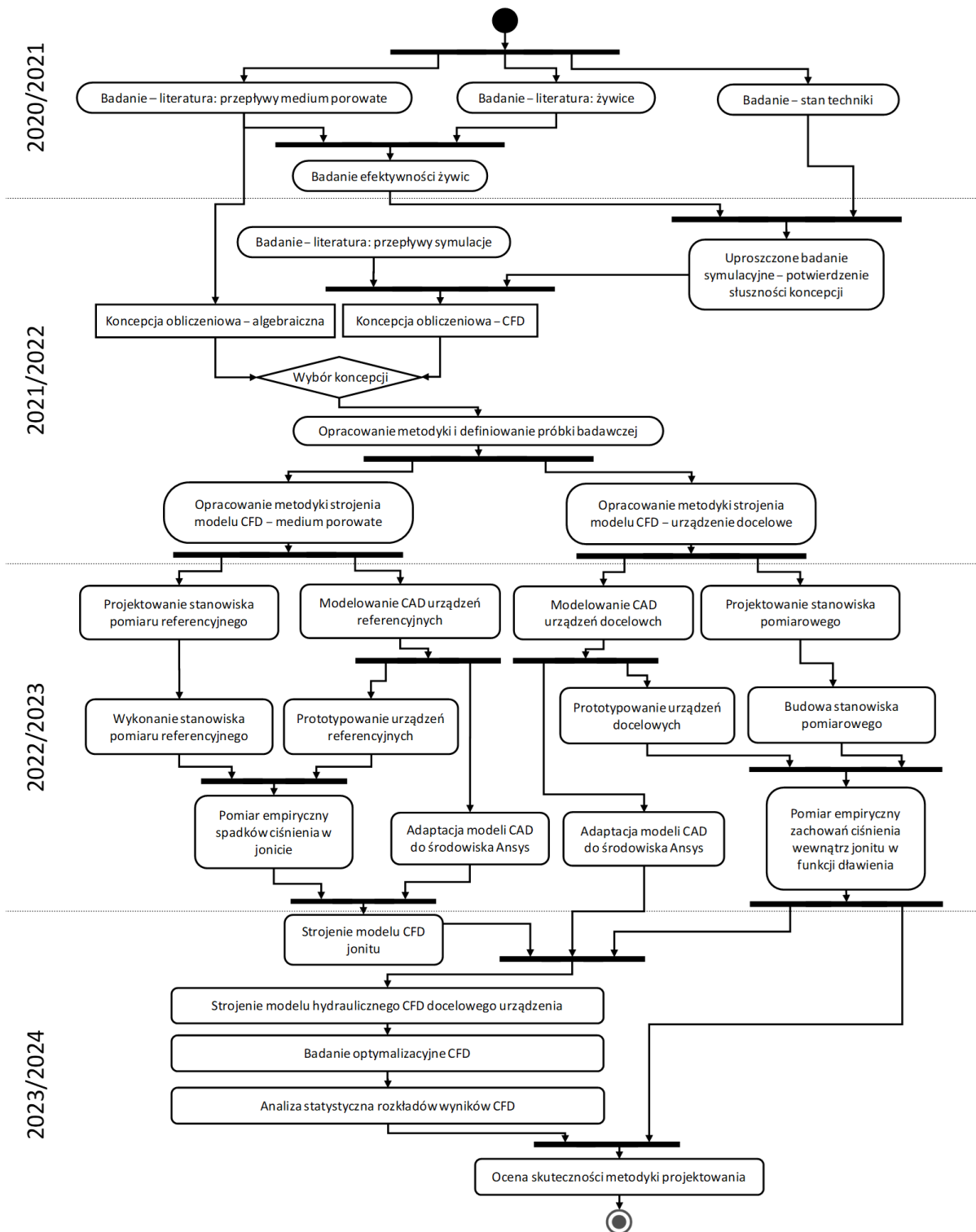
- zakres warunków pracy urządzenia docelowego w związku z przeznaczeniem do użycia w zmywarkach domowych o znanych uśrednionych parametrach pracy dotyczył przepływów

medium jednofazowego wody, nieprzekraczających 3 l/min, przy lepkości medium odpowiadającej temperaturze średniej wody sieciowej na poziomie 10°C;

2. z uwagi na niską proporcję dyssypowanej energii do masy układu nie były rozważane efekty termiczne;
3. z uwagi na niskie wartości prędkości liniowych przepływu pominięty został aspekt możliwości wystąpienia kawitacji;
4. dla pomniejszenia kosztu czasowego obliczeń symulacyjnych ściany zbiornika zostały w modelach symulacyjnych odwzorowane wyłącznie przez powierzchnie ograniczające domeny obliczeniowe przepływu;
5. dla uproszczenia badań empirycznych wartość ciśnienia na wylocie z układu została przyjęta jako atmosferyczna;
6. z uwagi na wysoki poziom złożoności badań symulacyjnych dynamiki wymiany jonowej jako pośredni wskaźnik homogenizacji wykorzystania pojemności jonowej zostały przyjęte miary statystycznego rozproszenia prędkości liniowej w objętości symulowanego złoża.

4.4 Plan badania

4.4.1 Mapa badawcza, za IPB



Rys. 33 Mapa badawcza wg Indywidualnego Planu Badawczego, przedstawiona w systematyce UML, z podziałem na lata akademickie

4.4.2 Opisowy plan badania

W ramach badania w oparciu o badanie literatury obszarów modelowania przepływów w medium porowatym, wymiany jonowej w silnie kwasowych żywicach diwinylobenzenowych zaprojektowane i przeprowadzone zostało szczegółowe badanie zachowania dostępnych na rynku preparatów jonowymiennych w precyzyjnie kontrolowanych warunkach, dla ustanowienia punktu wyjściowego do oceny przydatności rozważanego rozwiązania technicznego.

W następnym kroku przeprowadzone zostało wstępne, strojone empirycznie, badanie numeryczne przydatności koncepcji konstrukcyjnej w zastosowaniu produkcyjnym – w dostrojonym hydraulicznie modelu CFD oprogramowania SolidWorks FlowSimulation dokonano analizy porównawczej rozkładów izopowierzchni ciśnienia i prędkości przepływu dla dwóch wariantów analogicznych konstrukcji – jednej wykorzystującej koncepcję sterowania ciśnieniem i drugiej, niewykorzystującej koncepcji sterowania ciśnieniem.

W oparciu o wstępne numeryczne potwierdzenie zasadności koncepcji sterowania zdefiniowana została metodyka badania optymalizacyjnego konstrukcji wraz z przyjętym kryterium optymalizacji – miarą statystycznego rozproszenia populacji elementarnych prędkości w objętości symulowanego przepływu obszaru medium porowatego.

Dla uzyskania możliwie dokładnego odwzorowania rzeczywistego zachowania płynu w objętości symulowanej w oparciu o stan literatury opracowana została metodyka badawcza dwóch modeli empirycznych.

W pierwszej kolejności podjęte zostało badanie parametrów hydraulicznych preparatu wymiany jonowej, dla którego przeprowadzona miała zostać optymalizacja CFD. Na potrzeby badania parametrów hydraulicznych jonitu opracowany i wstępnie zoptymalizowany został model CAD konstrukcji oraz stanowiska dla wykonania pomiaru spadku hydraulicznego w zmierzonej geometrii.

Dla drugiego badania empirycznego, w geometrii docelowej, opracowana została szczegółowa metodyka strojenia modelu docelowego w oparciu o pomiary bocznego ciśnienia dynamicznego w przepływie w filtrze, bazująca na 10 sondach ciśnienia oraz zmienności warunków brzegowych dla uzyskania dużej zmiany wartości mierzonych.

Równolegle zaprojektowany i wykonany został model urządzenia pomiarowego docelowej geometrii, uwzględniającej precyzyjną lokalizację sond ciśnienia i możliwość przezbrajania badanego wymiaru dławiącego w konstrukcji oraz stanowisko pomiarowe, pozwalające na automatyczne zebranie pola wyników pomiarowych w przepływie.

Następnie geometria zbiornika geometrii docelowej została dokładnie odwzorowana w oprogramowaniu symulacyjnym pakietu Ansys Fluent, gdzie model został poddany analizie MIS pod kątem doboru stopnia zagęszczenia siatki.

W oparciu o przeprowadzone badania empiryczne strojenia spadków hydraulicznych w jonicie oraz badania pola ciśnienia wewnątrz geometrii docelowej dobrano parametry numeryczne dla strojenia modelu. Poprawność odwzorowania zachowania rzeczywistego została wykonana w oparciu o analizę statystyczną rozproszenia poziomu sygnałów czujników w systemie pomiarowym oraz o regresję liniową dla potwierdzenia stopnia korelacji uzyskanych wyników symulacyjnych ciśnienia zdefiniowanych punktów z poziomami stanu czujników w funkcji zmiany warunków brzegowych geometrii i strumienia przepływu dla łącznej liczby 10 sond i 12 wariantów, tj. 120 różnych punktów referencji.

W oparciu o potwierdzenie strojenia modelu podjęto serię symulacji dla przyjętego zakresu geometrii oraz strumieni przepływu.

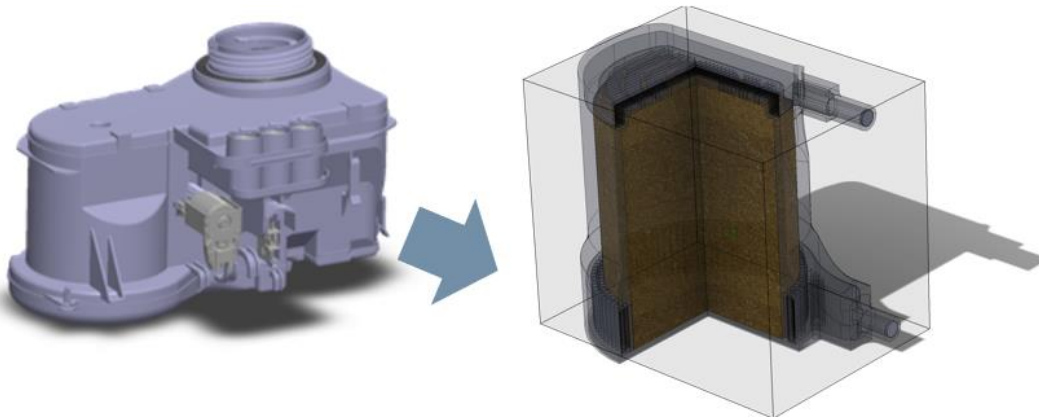
Wyniki symulacyjne szerokiego zakresu łącznej liczby 20 symulacji zostały poddane analizie statystycznej danych komórek obliczeniowych dla ustalenia miar rozproszenia prędkości liniowych w złożu symulowanym.

W ostatnim kroku obliczone miary rozproszenia statystycznego zostały zmapowane w funkcji zmiennych warunków brzegowych dla wykreślenia optymalnego punktu geometrii na możliwie wysokiej homogenizacji prędkości przepływu w złożu, co pozwoliło na określenie skuteczności metody dla oceny zmian parametru konstrukcyjnego na poziom homogenizacji.

4.5 Wstępne badanie symulacyjne CFD

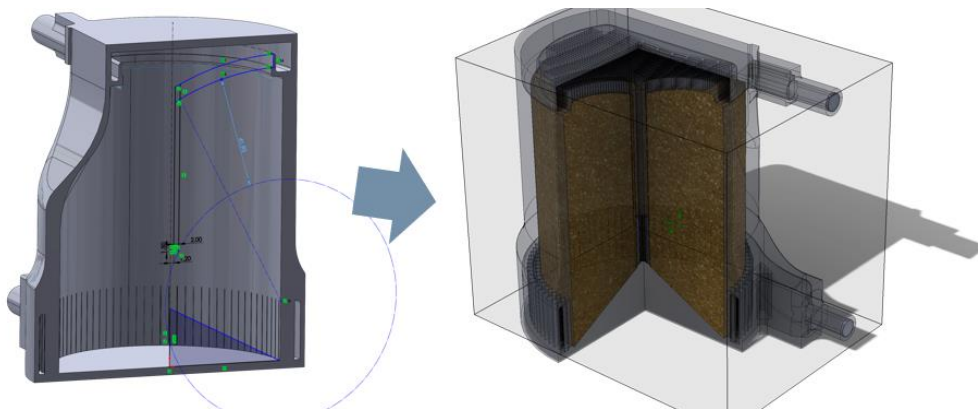
4.5.1 Opis przyjętego modelu konstrukcji

Do badania wstępnego symulacyjnego CFD, mającego określić zdatność koncipowanej konstrukcji do wywarcia zmian w polu skalarnym ciśnienia oraz polu wektorowym prędkości przepływu dla jego normalizacji wykorzystano model bazowy CAD komory jonowymiennej konstrukcji dedykowanej dla platformy produkcyjnej jednego z klientów, przedstawiony na rys. 34.



Rys. 34 Modele CAD zmiękczacza wyjściowego badania (po lewej) oraz bazowego prototypu badawczego (po prawej) przed zastosowaniem koncepcji konstrukcyjnej regulacji ciśnienia

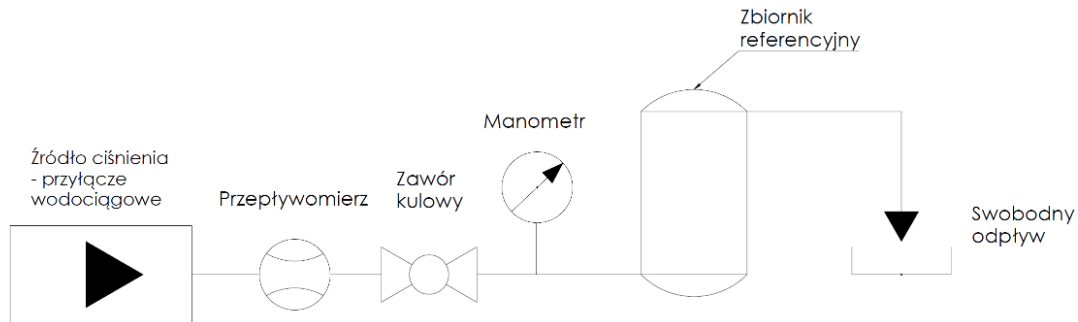
Zamodelowano następnie odpowiadający założeniom koncepcji pasywnego sterowania spadkiem ciśnienia, odpowiadający referencyjnemu zbiornikowi wykorzystującemu autorską zasadę sterowania wskazaną w PCT/CN2020/083801[95], co przedstawiono na rys. 35.



Rys. 35 Model CAD ze schematem szkicu nominalnych założeń geometrycznych regulacji (po lewej) oraz zamodelowany z zastosowaniem koncepcji konstrukcyjnej regulacji ciśnienia (po prawej)

4.5.2 Opis metodyki badania wstępnego

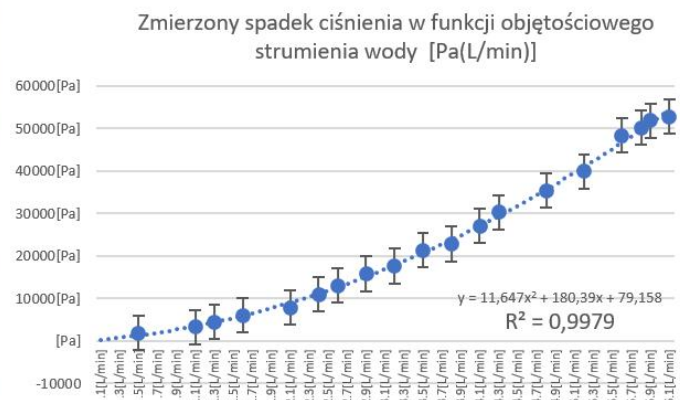
Strojenie zachowania wstępnego modelu zostało wykonane w oparciu o zdefiniowaną krzywą spadków ciśnienia dla zmierzonego empirycznie zachowania prototypu funkcjonalnej geometrii bazowej – schemat hydrauliczny układu pomiarowego został przedstawiony na rys. 36.



Rys. 36 Schemat hydrauliczny układu pomiarowego dla prototypu referencyjnego producenta

Na potrzeby badania wstępnego zachowania ciśnień w układzie bazowym wykonany został prototyp modelu referencyjnego.

Prototyp wykonany technikami mieszanymi (klejenie wykonanych przyrostowo w technologii FDM elementów z docinanymi manualnie płytami domykającymi zbiornik jonitu o parametrach hydraulicznych odpowiadających wytycznym projektowym) wraz ze stanowiskiem pomiarowym spadku ciśnienia został pokazany na rys. 37, wraz z pozyskanym wynikiem spadku ciśnienia.



Rys. 37 Zdjęcie prototypu badawczego referencyjnego oraz wykres zmierzonego spadku ciśnienia w funkcji objętości strumienia wody

4.5.3 Opis przyjętych warunków brzegowych symulacji

Komora charakteryzowała się radialnym wlotem oraz osiowo-normalnym wylotem z komory.

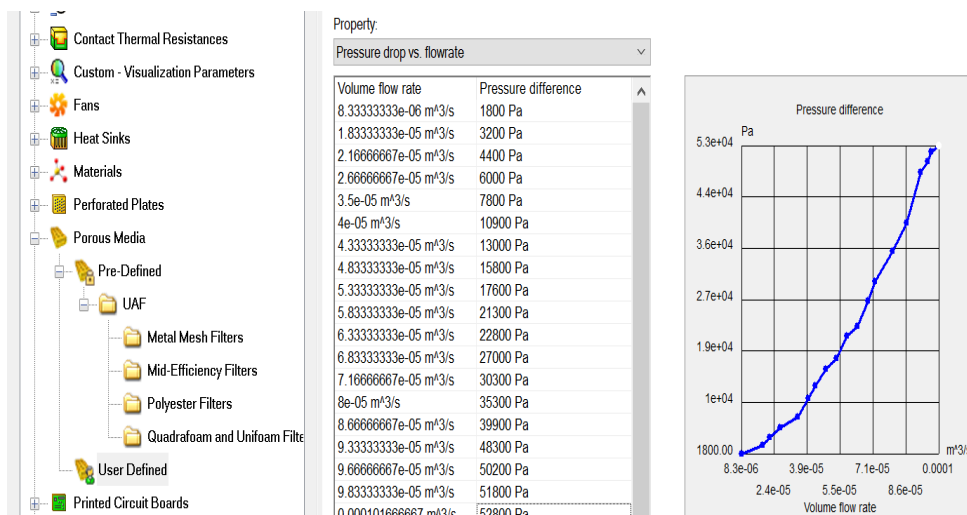
Do badania wstępnego przyjęto warunki pracy odpowiadające rzeczywistym warunkom określonym w wymaganiach technicznych klienta:

1. zbiornik o pojedynczym punkcie wlotu do przestrzeni annularnej;
2. annularna przestrzeń wokół radialnego sita wlotowego jako źródło hydrauliczne filtracji;
3. cylindryczna komora zawierająca żywicę jonowymienną – reprezentowaną jako ciało porowate;
4. objętość materiału jonowymiennego na poziomie 0,5 dm³;
5. przepływ objętościowy analizy porównawczej na poziomie 2 l/min.

Wstępna ocena zdolności rozwiązania została wykonana w programie SolidWorks Simulation.

Charakterystyka spadku ciśnienia w ciele porowatym została zdefiniowana jako funkcja zadanego spadku ciśnienia na jednostkę objętości w funkcji prędkości objętościowej przepływu w oparciu o wyniki empiryczne zachowania laboratoryjnego.

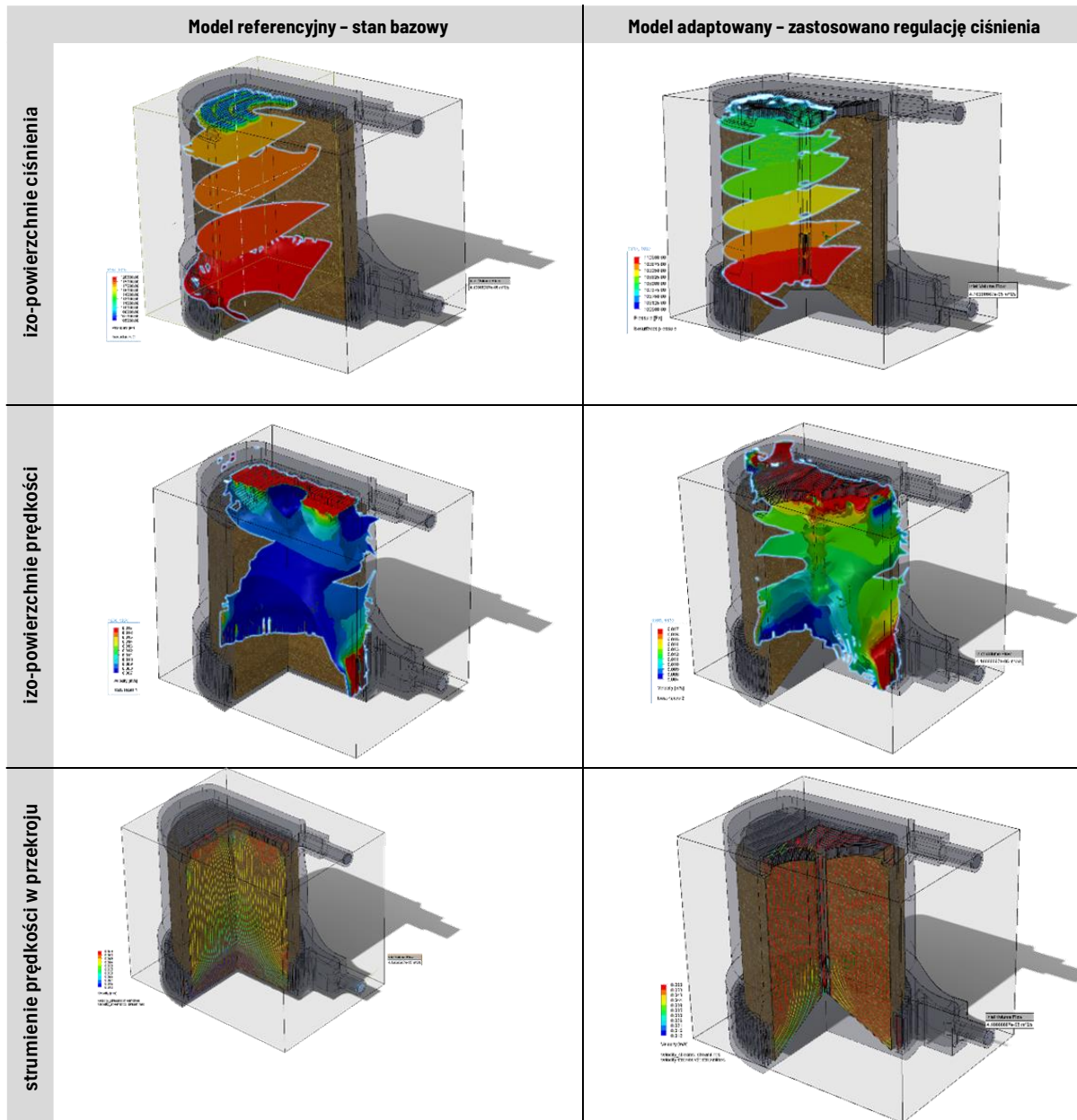
Parametr konfiguracyjny został przedstawiony na rys. 38.



Rys. 38 Zrzut ekranu parametrów konfiguracyjnych ciała porowatego testu wstępnego symulacji w SolidWorks Flow Simulation

4.5.4 Omówienie wyników wstępnego badania symulacyjnego – opis zaobserwowanego wpływu metodyki dławienia na pola skalarne ciśnienia i wektorowe prędkości w filtrze

Analiza porównawcza powierzchni izobarycznych, izopowierzchni prędkości strumieni oraz kształtu strumieni przepływu w obu wariantach modelowych potwierdziła słuszność koncepcji sterowania, jednak nie w sposób policzalny. Wizualizacje zmian izopowierzchni zostały przedstawione na rys. 39.



Rys. 39 Wizualizacja różnic zachowania pola skalarne ciśnienia i pola wektorowego przepływu wskutek zastosowania opisanej koncepcji konstrukcyjnej

Heurystyczna analiza zachowania pól ciśnienia reprezentowanych graficznie przez izopowierzchnie ciśnienia oraz pól prędkości strumieni w objętości reprezentowanych przez linie strumieni w przekroju wykazała zgodność rozwiązania konstrukcyjnego, zgłoszonego jako PCT/CN2020/083801[95] do ochrony patentowej jako metody pasywnego sterowania polami ciśnienia dla docelowego zwiększenia jednorodności przepływu w objętości filtracyjnej jonitu oraz przeprowadzenia optymalizacji konstrukcji w funkcji maksymalizacji wykorzystania pojemności użytego produkcyjnie surowca.

Z uwagi jednak na brak możliwości wykonania analizy statystycznej rozkładów prędkości elementarnych modelu symulacyjnego ciała porowatego programu Solidworks Flow Simulation oraz brak możliwości wykonania strojenia dla cech przepływu rzeczywistego wewnątrz jonitu jako konieczną dla docelowego cyklu strojenia zależności obliczeniowych określono adaptację metody strojenia modelu CFD oraz migrację modelu symulacyjnego dalszych planowanych prac do środowiska Ansys Fluent oraz podjęcie analizy zachowania pojemności w funkcji mechaniki przepływu dla różnych próbek żywic jonowymiennych.

4.6 Badanie porównawcze preparatów jonitowych do zastosowania w badanym rozwiązaniu konstrukcyjnym

Analiza zachowania hydraulicznego rozkładów prędkości elementarnych przepływu w symulacji zbiornika jonitowego przyjęta jako metodyka uzyskania pętli zwrotnej potencjalnej wydajności chemicznej rozwiązania wymaga w pierwszej kolejności podjęcia analizy zachowania chemicznego surowca w funkcji zachowania hydraulicznego w warunkach rzeczywistych.

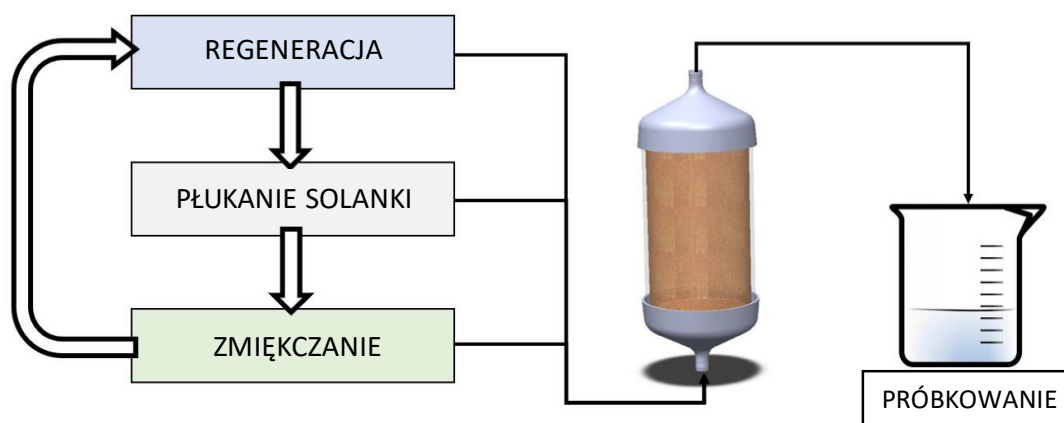
Badanie stanowiące podstawę niniejszej analizy zachowania zostało opublikowane przez autora tej rozprawy w czasopiśmie „Polymers” pod tytułem *Evaluation of Strong Cation Ion-Exchange Resin Cost Efficiency in Manufacturing Applications – Case Study*[26].

4.6.1 Opis przyjętej metodyki analizy zachowania preparatów jonitowych

Opracowano metodę porównawczą, której celem było skuteczne wyrównanie różnic natury hydraulicznej między próbkami produktów i osiągnięcie obiektywnego porównania wydajności chemicznej w ujęciu niezmienności warunków hydraulicznych, gdy są one stosowane w warunkach podobnych do tych występujących podczas normalnej pracy zmywarki, a tym samym odpowiadających warunkom pracy na dalszych etapach badania.

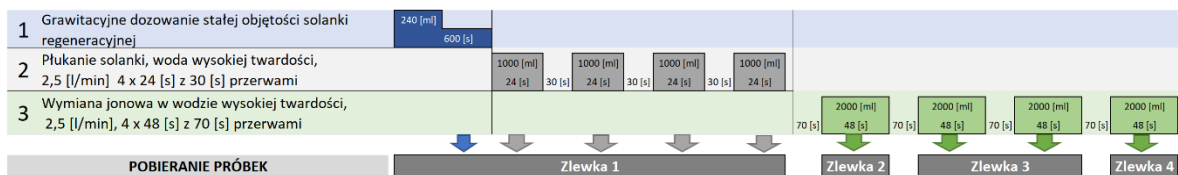
Próbki żywicy znormalizowanej hydrodynamicznie były eksploatowane w środowisku wodnym o twardości 68–69 dH i podlegały cyklicznej dynamicznej wymianie jonów w zautomatyzowanym procesie w ściśle porównywalnych warunkach.

Schemat logiczny cyklu został przedstawiony na rys. 40.



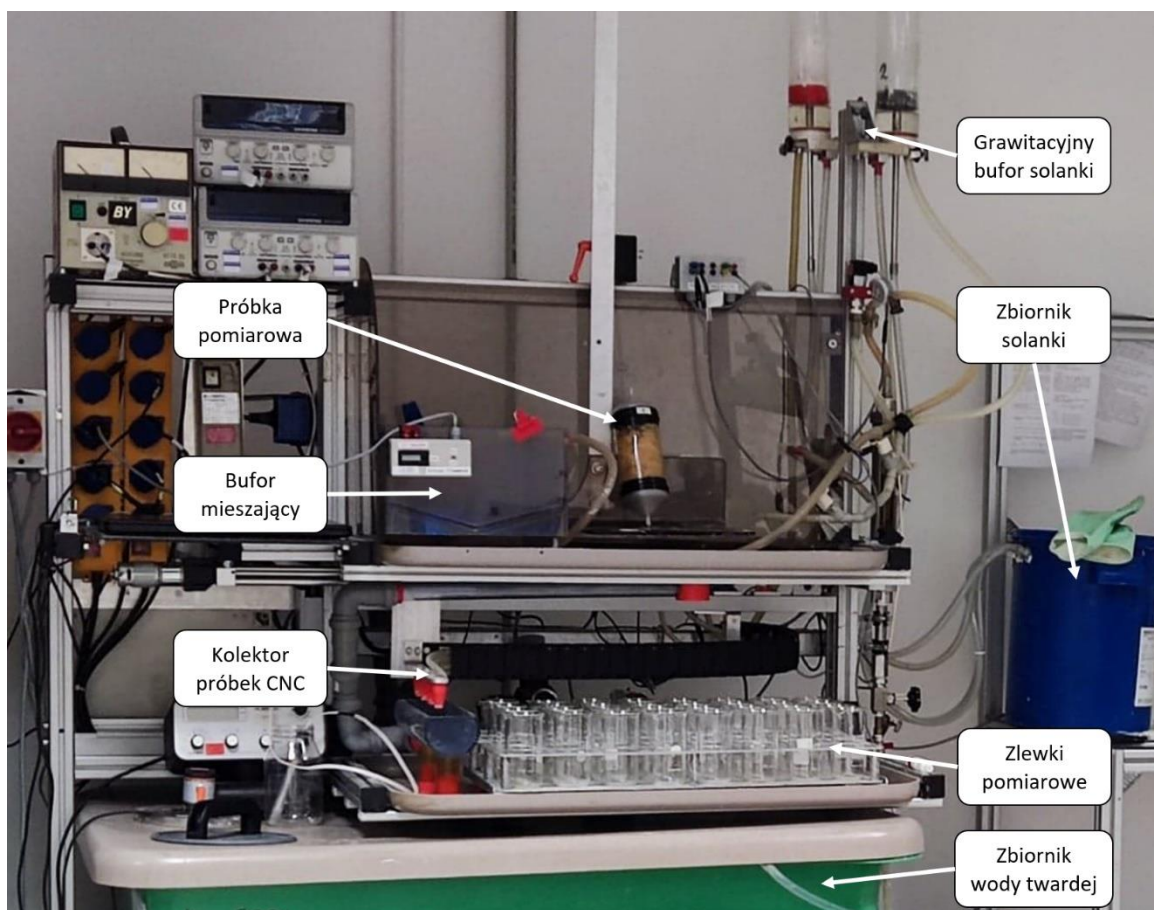
Rys. 40 Schemat cyklu pracy próbek jonitowych w teście pojemności wraz ze wskazaniem poboru próbek

Próbki żywicy podlegające testowi poddawane były cyklowi rozpoczynającemu się od regeneracji solankowej, następnie wstępnemu płukaniu solanką w 4 krótkich fazach oraz właściwemu pobieraniu próbek wody zmiękczonej w 4 porcjach. Schemat cyklu logicznego i czasowego pętli badania został przedstawiony na rys. 41.



Rys. 41 Schemat cyklu logicznego i czasowego pętli badania i pobierania próbek w teście pojemności jonowej

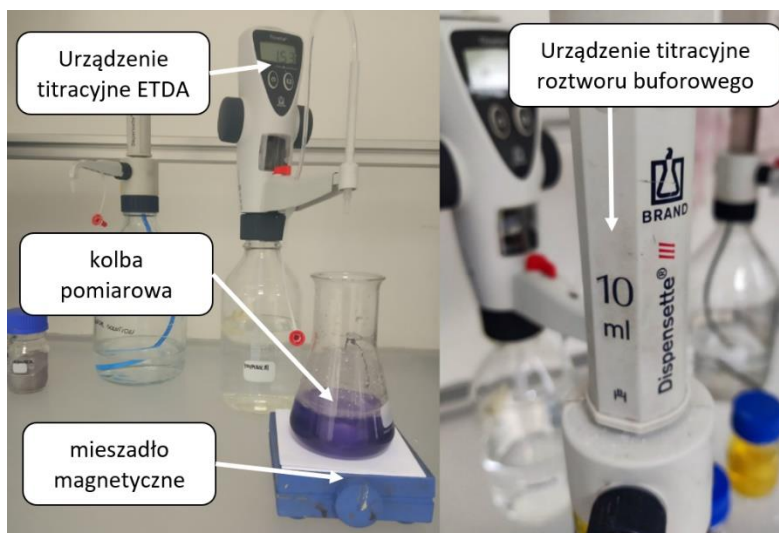
Do wykonania badania oraz zebrania próbek wykorzystana została aparatura będąca własnością podmiotu zatrudniającego autora niniejszej rozprawy, przedstawiona na rys. 42.



Rys. 42 Zdjęcie aparatury badawczej testera półautomatycznego pojemności jonowej żywic

Analiza chemiczna twardości resztkowej pobranych próbek wody poddanej obróbce zmiękczeniem została wykonana przy użyciu standardowej metody EDTA[96].

Aparatura wykorzystana do przeprowadzenia analizy chemicznej została przedstawiona na rys. 43.



Rys. 43 Zdjęcie aparatury titracyjnej do prowadzenia testów chemicznych metodą EDTA

4.6.2 Opis przygotowania próbek badawczych

Na potrzeby ujednorodnienia przepływu wewnątrz objętości żywicy opracowano geometrię zbiornika zakładającą jednorodny przepływ wewnątrz żywicy, z wykorzystaniem sit żywicznych produkcji seryjnej wykonanych z polipropylenu, przezrystą rurą akrylową dociętą na wymiar oraz kolektorów wykonanych w technologii FFF z polipropylenu.

Zbiornik próbki badawczej „G” (8 z 9) został przedstawiony na rys. 44.



Rys. 44 Zbiornik wystandaryzowany testu pojemności jonowej

4.6.3 Omówienie wyników badania porównawczego jonitów

W ramach badania uzyskano pulę wyników o łącznej liczbie 187 cykli dla 9 gatunków żywic o tożsamych parametrach granulacji przy zachowaniu niezmiennych parametrów hydraulicznych przepływu.

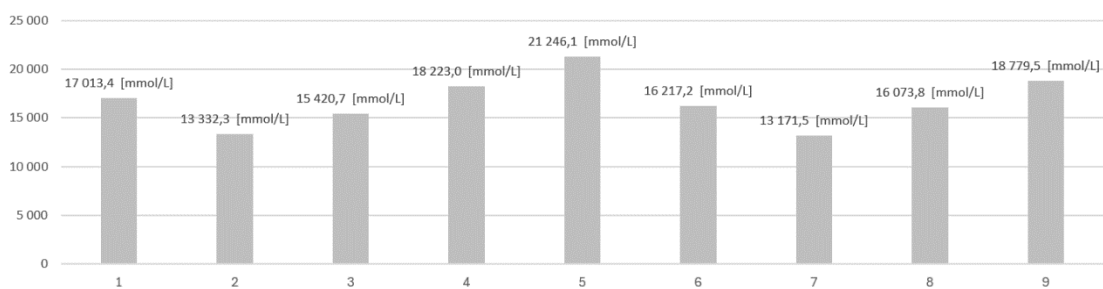
Badanie wykazało różnice w całkowitej pojemności jonowej wyrażonej w mmol na l jonitu przy przyjętej poprawce na różnice objętościowe i masowe wynikające z różnego poziomu wilgotności i spęcznienia jonitu w ujęciu stanu, w jakim próbki materiałowe zostały dostarczone przez producentów.

Analiza wyników wraz z innowacyjną metodyką porównawczą preparatów w ujęciu wydajności jonowej w zastosowaniu przemysłowym niebędąca przedmiotem tej rozprawy została opisana w osobnej publikacji[26].

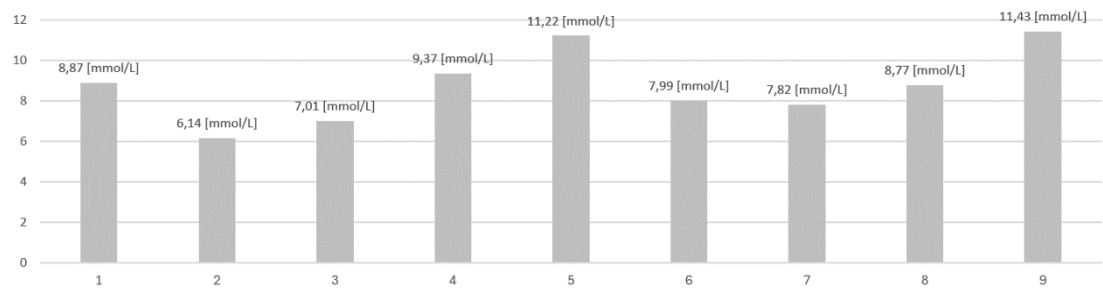
4.6.4 Analiza statystyczna korelacji zachowania hydraulicznego badania porównawczego jonitów

Do celów analizy zgodności konceptu korelowania niezmiennych w ramach puli testowej elementarnych prędkości liniowych przepływu objętościowego z wydajnością zmiękczenia wykorzystano porcję surowych danych pomiarowych opisującą zmierzoną retencję jonową poszczególnych preparatów w ramach faz zmiękczenia 2 i 3. Eliminacja faz zmiękczenia 1 i 4 wynikała z niepewności pomiarowych dotyczących jakości płukania resztek solanki w fazie pierwszej (mogącej przekłamywać wynik twardości resztkowej wody mierzonej metodą EDTA[96]) oraz zmienności wyników twardości fazy czwartej, potencjalnie wynikającej z braku kontroli stężenia solanki regeneracyjnej – potencjalna zmienność poziomu wysycenia roztworu mogła wpływać na stopień regeneracji żywicy w cyklu, potencjalnie wpływając na moment wysycenia żywicy jonami Ca^{2+} .

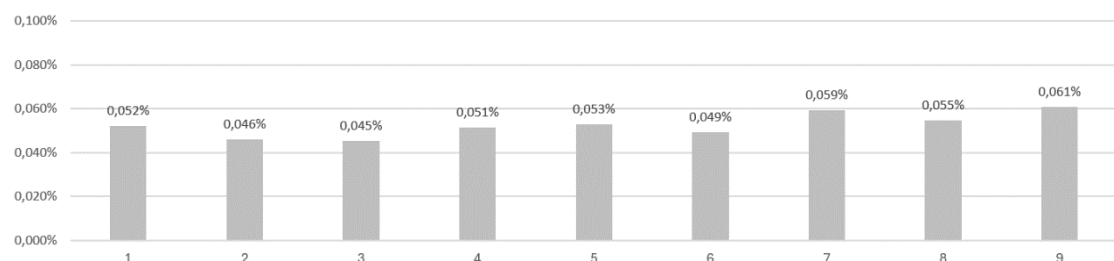
Analiza zmienności odchyłeń standardowych pomiarów chemicznych twardości wody pierwszych dwóch faz zmiękczenia pomiędzy poszczególnymi cyklami dla każdej z żywic pokazała niezmiennosc parametru retencji jonowej poszczególnych preparatów przy zachowaniu stałego parametru objętościowego przepływu. Wykonana na potrzeby oceny metodyki analiza zmienności odchylenia wyników została przedstawiona na rys. 45–47.



Rys. 45 Średnia pojemność jonowa próbek żywicy w fazie zmiękczenia 2–3, próbki 1–9



Rys. 46 Odchylenie standardowe pojemności jonowej próbek żywicy w fazie zmiękczenia 2–3, próbki 1–9



Rys. 47 Stosunek odchylenia standardowego pojemności jonowej próbek żywicy w fazie zmiękczenia 2–3 do średniej pojemności jonowej żywicy w fazie zmiękczenia 2–3, próbki 1–9

Analiza rozkładu stosunku odchylenia standardowego pojemności jonowej w ramach poszczególnych próbek do średniej wartości pojemności próbek w fazach zmiękczenia 2–3 wykazała wariację wskaźnika

na poziomie $2,479 \times 10^{-9}$. Pozwala to wnioskować o niezmienności parametru retencji jonowej jonitu przy zachowaniu stałego parametru przepływu.

Niezmiennosc zachowania retencji jonowej poszczególnych próbek przy stałym rozkładzie objętościowym przepływu modelu referencyjnego w połączeniu ze stanem wiedzy dotyczącym modelu dyfuzyjnego wymiany jonowej na powierzchni jonitu [30], [97], [98] zależnego od lokalnych stężeń molowych i czasu zachodzenia procesu, zależnych w czasie wprost od czasu ekspozycji elementarnej cząstki płynu na jonit oraz stężenia jonów w elementarnej cząstce płynu zależnego od czasu wcześniejszej ekspozycji na jonit, a tym samym od sumy elementarnych prędkości na trasie cząsteczki elementarnej płynu – pozwala wnioskować o zdatności skonceptowanej metody korelowania miar rozproszenia elementarnych prędkości liniowych płynu w objętości jonitu z chemiczną wydajnością zmiękczenia.

4.7 Badanie empiryczne i symulacyjne CFD rozwiązania konstrukcyjnego

4.7.1 Opis dobranego modelu symulacyjnego oraz warunków strojenia

Analiza jednorodności przepływu w objętości oparta na analizie jednorodności numerycznej parametrów prędkości liniowych w modelu CFD wymaga modelu odwzorowującego wiernie objętościowe zachowania płynu w modelu rzeczywistym – wymaga tym samym geometrii pozwalającej na realizację procesu strojenia zarówno dla modelu numerycznego spadków hydraulicznych samego jonitu, jak i geometrii docelowej pozwalającej na weryfikację empiryczną próbek parametrów z wnętrza objętości filtra, dla którego wnętrza elementarne wartości prędkości przepływu płynu podlegać będą analizie rozkładu.

W modelu rzeczywistym występują dwa główne źródła istotnych spadków hydraulicznych w przepływie objętościowym:

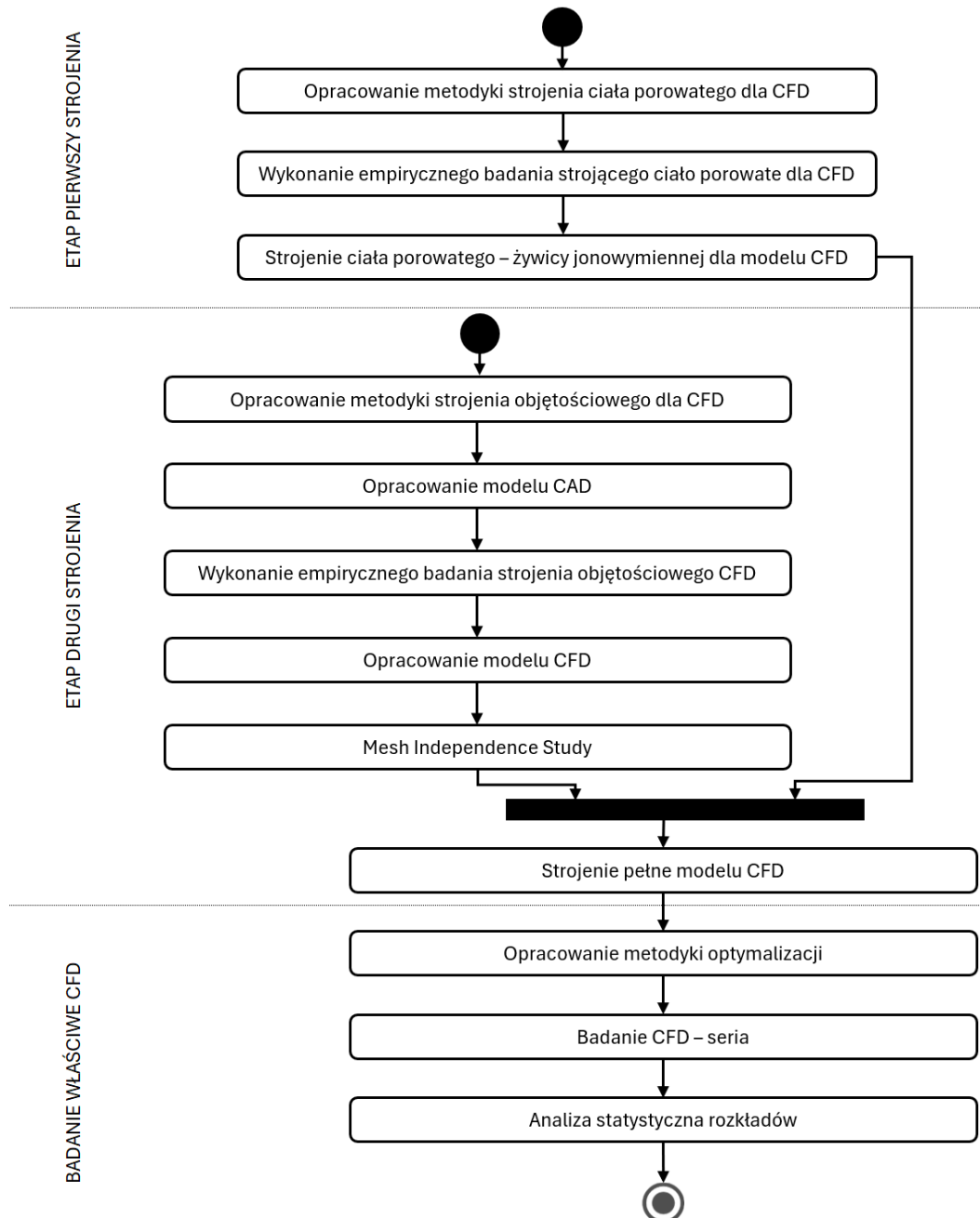
1. pierwszym źródłem jest występowanie dużych ilości przewężeń przepływu (szczelin) na sitach pozwalających na utrzymanie granulatu jonitowego w objętości konstrukcyjnej zbiornika – przewężeń generujących lokalne wzrosty prędkości, a tym samym generujące spadki hydrauliczne wynikające bezpośrednio z przekształcenia energii ciśnienia na energię kinetyczną przepływu. Sita oraz konstrukcyjny otwór dławiący są częściami podlegającymi analizie przepływu w konkretnej geometrii, dla których istotne znaczenie będą miały efekty bezwładnościowe płynu;
2. drugim źródłem rozważanego spadku ciśnienia jest filtr jonitowy, w którym spadki ciśnienia generowane są przez lepkościowe efekty przyścienne przestrzeni międzygranularnej ziaren żywicy jonitowej oraz spadki wynikające ze zmiany kierunków przepływu elementarnych strumieni płynu przy przepływie przez przestrzeń międzygranularną. Efekty spadku ciśnienia w filtrze z uwagi na istotne zwiększenie światła przepływu w ujęciu wymiarów filtra dotyczą bardzo niskich prędkości przepływu, w związku z czym efekty bezwładnościowe są pomijalne – analiza spadków hydraulicznych oparta będzie na modelu stochastycznym, niezależnym od geometrii konstrukcyjnej.

W związku z występowaniem dwóch nierozróżnialnych pomiarowo źródeł spadku energii przepływu w docelowym modelu symulacyjnym warunki strojenia powinny przyjąć formę dwuetapową.

W pierwszej kolejności konieczne jest wierne odwzorowanie zachowania płynu w przepływie filtracyjnym dla rzeczywistych parametrów odwzorowywanego symulacyjnie filtra, a w następnej kolejności, z wykorzystaniem znanego stochastycznego parametru spadku hydraulicznego dla wykorzystanego filtra,

konieczna jest weryfikacja wpływu modelu symulacyjnego fizycznego płynu w ujęciu zjawisk bezwładnościowych na zachowanie ciśnień wewnątrz symulowanego jonitu.

Schemat badania, rozpoczynający się od opracowania metodyki strojenia ciała porowatego oraz równoległego opracowania metodyki strojenia objętościowego dla szczególnej geometrii badanego rozwiązania konstrukcyjnego, został przedstawiony na rys. 48.



Rys. 48 Schemat głównego badania optymalizacyjnego konstrukcji

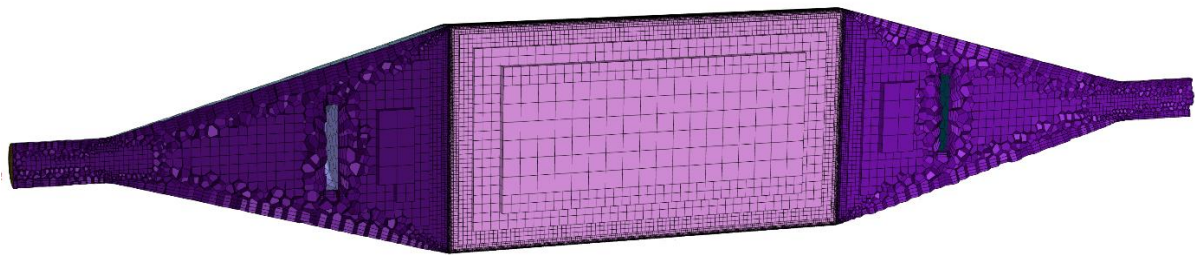
4.7.2 Opis konstrukcyjny urządzenia badawczego strojenia filtra

Urządzenie wykorzystane przy strojeniu modelu filtracyjnego zostało opracowane w taki sposób, aby zminimalizować efekty bezwładnościowe płynu w przepływie celem minimalizacji wpływu strojenia modelu symulacyjnego energii płynu[76] na korelację wyników empirycznych z symulacyjnymi.

Do tego celu w środowisku CAD opracowany został model przestrzenny urządzenia badawczego spełniający następujące warunki:

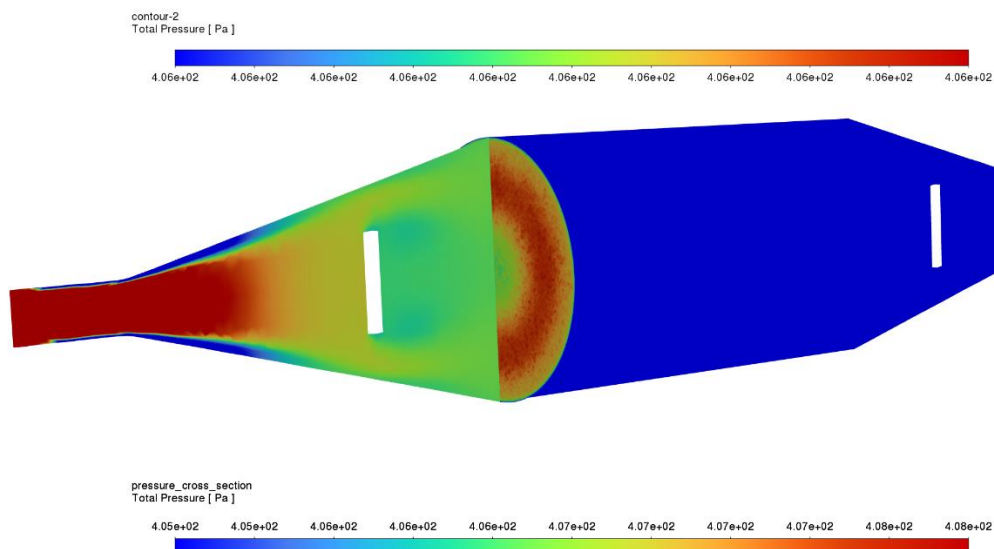
1. powierzchnia wlotowa i wylotowa żywicy stanowią równoległe, koncentryczne powierzchnie o przekroju kołowym;
2. analiza rozkładu elementarnych ciśnień całkowitych przed filtrem jest możliwie jednorodna w płaszczyźnie przejścia przez barierę filtra;
3. bariera filtra jest możliwa do prototypowego wykonania z otwartej siatki stalowej, o całkowitym świetle przekrojowym przepływu wyższym od statystycznej przekrojowej przestrzeni międzygranularnej;
4. geometria zbiornika pozwala na utrzymanie stochastycznie ujętego przepływu w filtrze w jednej osi, w której elementarne przekroje jonitu pozostają niezmiennie na całej długości (cylinder).

W wyniku opracowania geometrii spełniającej powyższe kryteria przeprowadzono migrację modelu CAD do środowiska Ansys Fluent celem przeprowadzenia oceny heurystycznej zachowania przepływu bezwładnościowego w modelu. Siatka migrowanego modelu została przedstawiona na rys. 49.

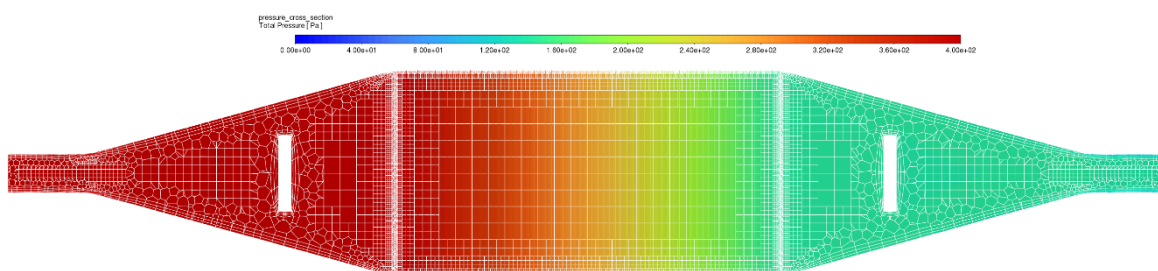


Rys. 49 Przekrój siatkowy modelu CAE Ansys Fluent – moduł Meshing dla urządzenia strojącego spadki hydrauliczne jonitu

Wizualizacja rozkładów prędkości w przekroju wzdłużnym zbiornika oraz rozkładu ciśnień w płaszczyźnie granicznej filtra i przepływu bezwładnościowego została zwizualizowana na rys. 50–51.



Rys. 50 Wizualizacja rozkładów prędkości w przekroju wzdłużnym zbiornika oraz rozkładu ciśnień w płaszczyźnie granicznej filtra i przepływu bezwładnościowego urządzenia strojącego spadki hydrauliczne jonitu



Rys. 51 Wizualizacja gradientu ciśnienia wewnątrz domeny filtra żywicznego urządzenia strojącego spadki hydrauliczne jonitu

Ocena rozstępu ciśnień w ramach powierzchni granicznej jonitu na poziomie $<1\%$ ciśnienia symulowanego oraz ocena liniowości spadku ciśnienia w osi Z dla objętości żywicy zostały przyjęte jako wystarczająca dla zachowania możliwie dużej jednorodności przepływu wewnątrz filtra na potrzeby badania empirycznego strojenia spadku hydraulicznego.

4.7.3 Opis wykonania urządzenia badawczego strojenia filtra

Urządzenie badawcze dla strojenia parametrów filtra zostało wykonane w technologii mieszanej:

1. obudowa elementu została wytworzona przyrostowo z przejrzystej żywicy światłoutwardzalnej, w trzech rozdzielnych elementach, w technologii MSLA z użyciem urządzenia Elegoo Saturn 2;
2. dwie przegrody mieszające zostały wykonane w technologii FFF z użyciem urządzenia Prusa MK3s;
3. dwie przegrody filtracyjne, podtrzymujące żywicę w obrysie podstaw cylindra komory zostały wycięte na wymiar z siatki nierdzewnej stalowej o wymiarze oczka 0,2 mm tkanej z drutu 0,15 mm – o całkowitym prześwicie na poziomie 32,6%, pokazanej na rys. 52;
4. żywica wymiany jonowej została dobrana zgodnie z wytycznymi konstrukcyjnymi urządzenia docelowego;
5. podstawa poziomująca została wykonana w technologii FFF z użyciem urządzenia Prusa MK3s.

Krytyczną częścią wykonania prototypu badawczego, mającą potencjalnie istotny wpływ na mierzone zachowanie spadku hydraulicznego, był wpływ zmian objętościowych jonitu wskutek spęcznienia na objętość roboczą jonitu.



Rys. 52 Zdjęcie rolki zastosowanej siatki mesh o wymiarze oczka 0,2 m tkanej z drutu 0,15 mm

Ilość materiału potrzebnego dla wypełnienia objętości została przeliczona zgodnie ze stanem wiedzy dla poprawki na zmianę objętości granulatu dla maksymalnego poziomu wilgotności wewnętrznej granulatu suchego[26].

Prototyp badawczy został zintegrowany z użyciem kleju cyjanoakrylowego z uwagi na wysoką skuteczność chemii kleju przy łączeniu elementów wykonanych z żywic światłoutwardzalnych oraz z uwagi na niską objętość potencjalnego naddatku materiału, mogącą wpływać na zachowanie hydrauliczne płynu w przepływie bezwładnościowym.

Prototyp testowy został przedstawiony na zdjęciu widocznym na rys. 53.



Rys. 53 Zdjęcie prototypu badawczego referencji zmierzonego spadku ciśnienia w funkcji prędkości liniowej przepływu dla kalibracji Ansys Fluent

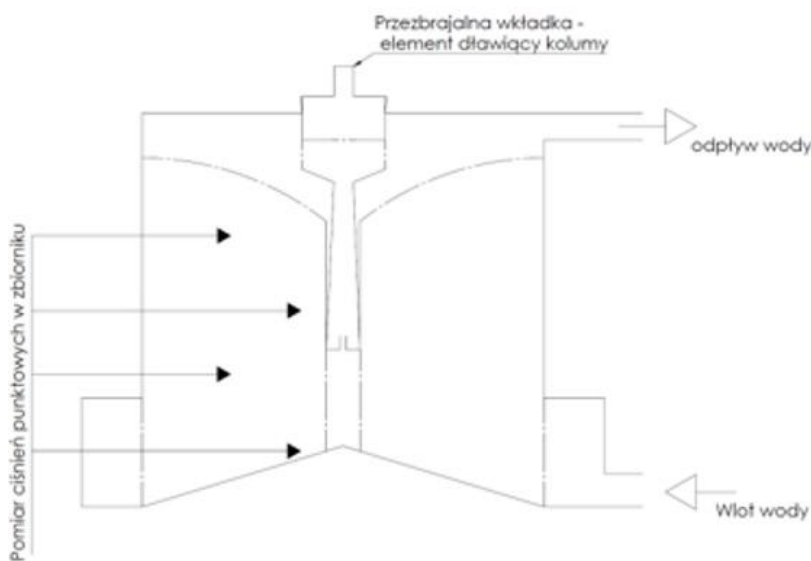
Dla wykonania badania spadku ciśnienia hydraulicznego wykorzystany został układ hydrauliczny analogiczny do badania wstępnego spadków ciśnienia dla strojenia modelu SolidWorks Flow Simulation, pokazany na rys. 36.

4.7.4 Opis konstrukcyjny urządzenia badawczego geometrii docelowej

Urządzenie badania docelowej geometrii konstrukcyjnej dla drugiego etapu strojenia modelu numerycznego w środowisku Ansys musiało spełnić szereg kryteriów:

1. geometria zbiornika jednoznacznie musiała zdefiniować punkty pomiaru ciśnienia w objętości;
2. punkty pomiaru zrealizowane zostały przez gniazda igieł nierdzewnych (np. medycznych);
3. wymiar igieł nierdzewnych musiał być możliwie mały, przy uwzględnieniu wpływu ciśnienia kapilarnego na pomiar ciśnień punktowych;
4. geometria zbiornika zakładała wykorzystanie pojedynczego prototypu badawczego kolumny, w której pole badawcze wymiarów otworu regulacji ciśnienia zapewnione było przez możliwość przezbrajania precyzyjnie wykonanej wkładki;
5. wszystkie elementy zaprojektowane zostały z uwzględnieniem ograniczenia technologii wytworzenia – przyjęto wykorzystanie technologii AM – MSLA oraz precyzyjnej obróbki wymiarowej otworów regulujących ciśnienie wkładek z pomocą serii rozwiertaków o znanej średnicy dla zachowania możliwie wysokiej dokładności wymiarowej elementów krytycznych;
6. wszystkie części krytyczne dla spadku hydraulicznego docelowego pojemnika (szczeliny wlotowe promieniowe, szczeliny odbioru osiowe) zaprojektowane zostały z uwzględnieniem docelowych ograniczeń technologicznych formowania wyprasek wtryskowych, w tym kątów odformowania.

Na schemacie ideowym na rys. 54 przedstawiono koncepcję projektu zbiornika testu empirycznego drugiego etapu strojenia.

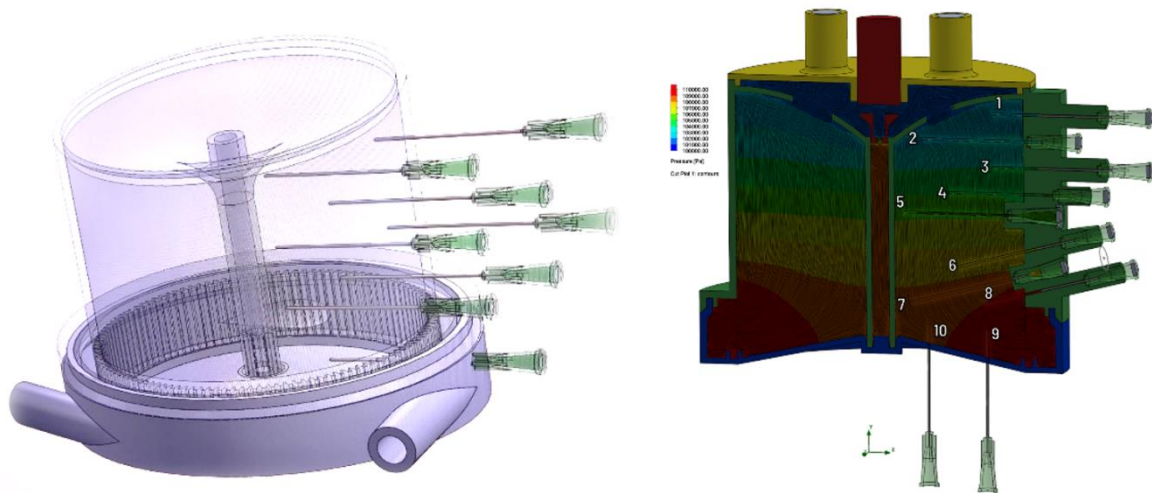


Rys. 54 Schemat koncepcyjny zbiornika testu geometrii docelowej zawierającego element przezbrajalnej wkładki dławiącej

Istotnym elementem przygotowania koncepcji konstrukcji prototypu badawczego było uwzględnienie wpływu ciśnień kapilarnych na odczyty ciśnień bocznych strumienia przepływu przy wykorzystaniu rozwiązania próbników w postaci igieł.

Analiza kalkulacji składników ciśnienia kapilarnego wykazała, że konieczne jest zastosowanie pomiędzy sondami ciśnienia a czujnikami ciśnienia zbiornika buforowego z doprowadzeniem przewodu sondy w taki sposób, aby promień lustra w zbiorniku był możliwie duży w stosunku do napięcia powierzchniowego na granicy wody i powietrza.

W oparciu o warunki pracy przyjęte dla koncypanego zbiornika zaprojektowany w środowisku CAD został model zbiornika pomiarowego. Opracowanej geometrii przypisano kolejne numery dla lokalizacji portów pomiarowych, jak zwizualizowano na rys. 55.

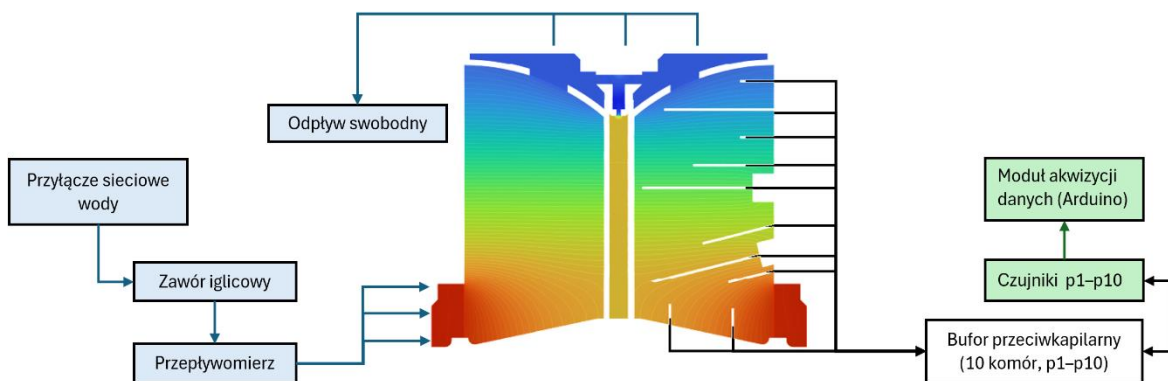


Rys. 55 Widok modelu CAD – SolidWorks (z lewej) oraz CAE SolidWorks Flow Simulation z zaznaczonymi pozycjami numeracji gniazd igieł pomiarowych p1–p10 (z prawej)

Model zbiornika koncepcyjnego dla badania zawierał następujące części funkcjonalne:

1. radialny dopływ wody procesowej;
2. sito radialne uwzględniające ograniczenia procesowe docelowego procesu wyprasek wtryskowych;
3. zbiornik jonitu o zdefiniowanej uprzednio objętości i proporcji;
4. koncepcyjny kanał regulacji ciśnienia pozwalający na przezbrowanie konstrukcyjne wymiaru otworu dławiącego uwzględniający ograniczenia procesowe docelowego procesu wyprasek wtryskowych;
5. sito toroidalne uwzględniające ograniczenia procesowe docelowego procesu wyprasek wtryskowych;
6. kolektor wody procesowej;
7. zestaw króćców przyłączeniowych dla badania wraz z bryłą dobranych do badania igieł pomiarowych o zdefiniowanej w modelu pozycji punktów pomiarowych poboru ciśnienia p1–p10.

Schemat szczegółowy zbiornika wraz z układem logicznym testu został przedstawiony na rys. 56.



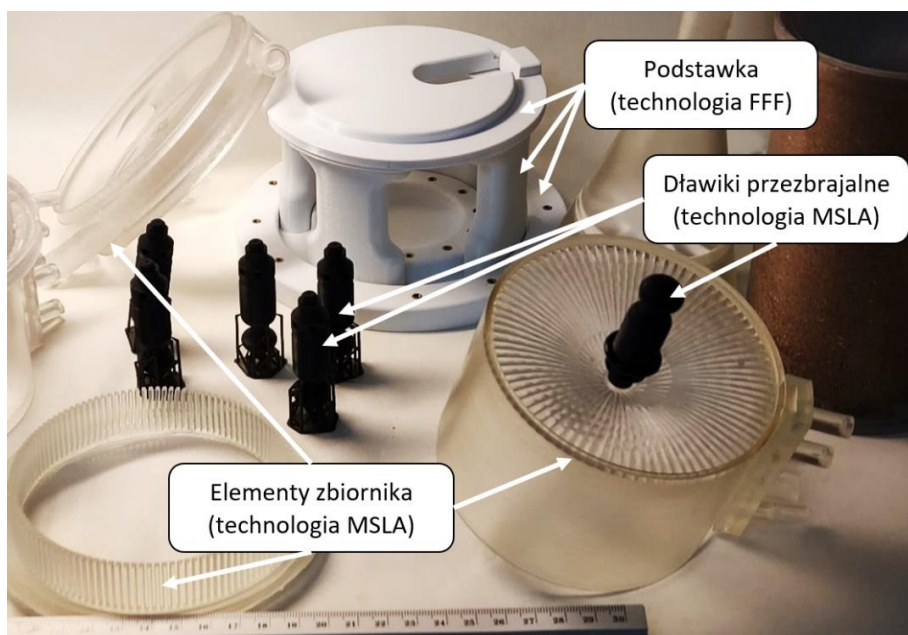
Rys. 56 Schemat logiczny docelowego urządzenia testowego dla kalibracji modelu CFD Ansys Fluent w oparciu o zestaw wewnętrznych czujników ciśnienia p1–p10

4.7.5 Opis wykonania urządzenia badawczego o geometrii zbliżonej do produkcyjnej

Zbiornik badania empirycznego dla strojenia objętościowego modelu numerycznego wykonano w mieszanych technologiach prototypowania, zgodnie z uprzednio przyjętymi założeniami konstrukcyjnymi.

Elementy obudowy integrujące sita oraz ściany pozycjonujące sond wykonane zostały z przezrystej żywicy światłoutwardzalnej w technologii MSLA przy użyciu urządzenia Elegoo Saturn 2, w 4 elementach odpowiadających 3 elementom wykonywalnym w technologii wyprasek wtryskowych, przy zachowaniu ograniczeń konstrukcyjnych dla technologii MSLA oraz wyprasek wtryskowych, z osadzeniem klejonym wkładek gwintowanych M3 dla umożliwienia wielokrotnego przezbrajania geometrii dławiącej. Dla poprawy przezierności elementów zbiornika wszystkie elementy zostały poddane wieloetapowemu szlifowaniu, a następnie lakierowaniu przy pomocy wodoodpornego lakieru poliuretanowego z maskowaniem powierzchni przeznaczonych do klejenia.

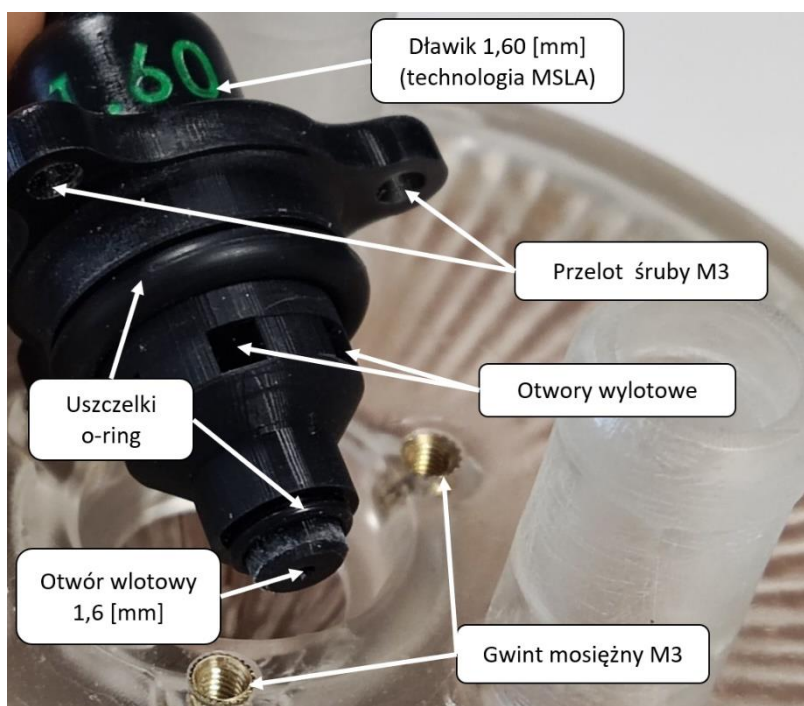
Komponenty drukowane zostały przedstawione na rys. 57.



Rys. 57 Zdjęcie elementów drukowanych w technologiach MSLA/FFF użytych do integracji komory testowej

Elementy przezbrajanej geometrii dławienia przepływu w kolumnie centralnej zostały wykonane w technologii MSLA przy użyciu urządzenia Elegoo Mars 2P, a następnie poddane obróbce skrawaniem przy pomocy rozwiertaków dla uzyskania precyzyjnego wymiaru dławienia. Elementy zostały dodatkowo wypełnione farbą akrylową w przetłoczeniach oznakowania wymiaru poszczególnych dławików dla poprawy widoczności znakowania w testach.

Powiększony widok wkładki przezbrajającej został przedstawiony na rys. 58.



Rys. 58 Zdjęcie elementu przezbrajanego w wariantcie wymiarowym 1,60 mm na tle siedziska elementu przezbrajanego w komorze jonitu

Sondy ciśnienia o średnicy wewnętrznej 0,3 mm zostały zaadaptowane z nierdzewnych igieł o przeznaczeniu medycznym.

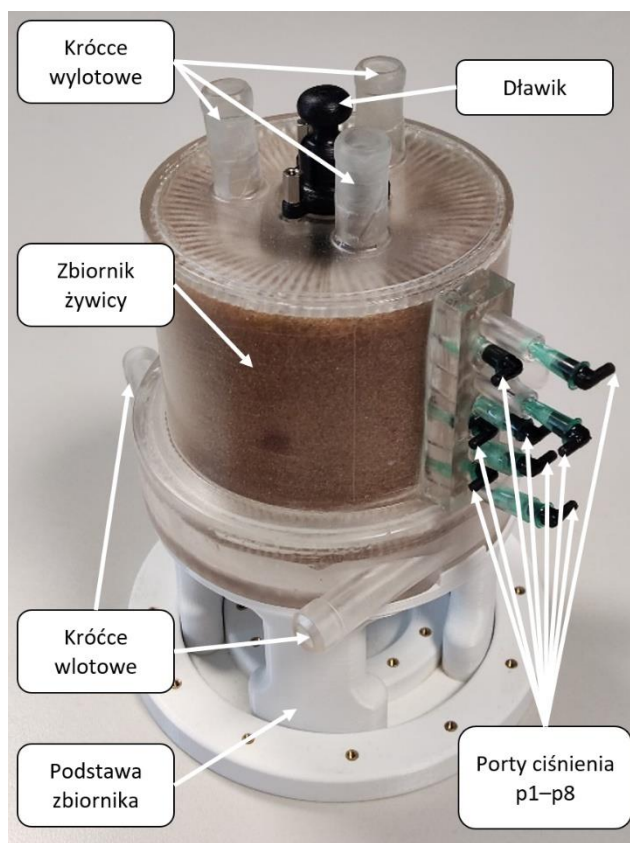
Króćce węży silikonowych dla podpięcia czujników ciśnienia zostały wykonane w technologii MSLA przy użyciu urządzenia Elegoo Mars 2P, a następnie poddane manualnej obróbce powierzchniowej dla uzyskania jakości powierzchni pozwalającej na uzyskanie szczelnego połączenia klejonego z kołnierzami igieł oraz szczelnego połączenia kompresyjnego z przewodami silikonowymi ciśnienia $\phi = 3$ mm.

Kołnierze kompresyjne końcówek przewodów silikonowych pomiaru ciśnienia zostały wykonane w technologii SLA przy użyciu urządzenia Formlabs Form3.

Uszczelki EPDM (o-ringi) zostały dobrane katalogowo dla dostępności gotowych rozwiązań doszczelnienia elementów przezbrojenia.

Integracja elementów konstrukcyjnych zbiornika została zrealizowana przez autora przy pomocy żywicy światłoutwardzalnej tożsamej z materiałem wydruku dla możliwie dużej kompatybilności chemicznej trwałego łączenia – żywicę nakładano przy pomocy pipet Pasteura na obie powierzchnie łączenia, a następnie dzięki wykorzystaniu wysokiej przezierności elementów łączonych linie łączenia zostały naświetlone przy pomocy lampy ręcznej o długości fali 405 nm.

Zintegrowany zbiornik na podstawie został przedstawiony na rys. 59.



Rys. 59 Zdjęcie zintegrowanego zbiornika testowego geometrii docelowej z przezbrajanymi wkładkami dławicowymi na podstawie testowej

Objętość robocza żywicy niezbędna dla całkowitego wypełnienia zbiornika została pozyskana z modelu CAD w środowisku SolidWorks przy pomocy narzędzia „analiza masy”, a następnie poddana przeliczeniu z poprawką na zmianę objętości ziaren zgodnie z publikowaną uprzednio autorską metodyką[26].

Prototyp badawczy został dodatkowo wyposażony w wykonaną w technologii FFF z pomocą urządzenia Prusa MK3s podstawę umożliwiającą uniesienie prototypu dla niwelacji kolizji portów ciśnienia numer 9 i 10 (niewidocznych na rys. 59 z uwagi na pozycję poniżej poziomu króćców wlotowych) z powierzchnią blatu roboczego.

4.7.6 Opis konstrukcji i logiki działania stacji badawczej

Stacja badawcza dla przeprowadzenia badania porównawczego empirycznego dla strojenia została zaprojektowana zgodnie z założeniami przyjętymi jako istotne dla pozyskania danych pozwalających na realizację procesu objętościowego strojenia modelu jonitu w środowisku symulacyjnym Ansys Fluent.

Stanowisko zaprojektowano jako bazę dla szeregu 10 cyfrowych pięciowoltowych modułów czujnika ciśnienia opartych na przetworniku ciśnienia oraz chipie HX710B, kontrolowanych przez moduł Arduino ATM2560 jako element zbierający dane z czujników ciśnienia. Dziesięciokomorowy element buforu wodnego niwelującego mechanicznie przewidziany wpływ ciśnień kapilarnych systemu pomiarowego po stronie prototypu badawczego został zamodelowany w bazie stanowiska akwizycji danych wraz z przyłączami ciśnieniowymi 3 mm uwzględniającymi zaciski doszczelniające dla przewodów silikonowych. Ponadto w stanowisku umiejscowiono listwy rozdzielające zasilanie czujników z magistrali zasilania modułu ATM2560, przewidziano również miejsce na uporządkowanie okablowania czujników i konstrukcję rozprowadzenia kanałów ciśnienia do czujników pomiarowych z buforu wodnego. W geometrycznym środku stanowiska znalazł się układ podtrzymania mechanicznego samego układu akwizycji danych ATM2560.

Wszystkie elementy konstrukcyjne stacji badawczej zostały zaprojektowane dla możliwie nieskomplikowanego procesu wytworzenia dobranymi metodami przyrostowymi – metodami SLA, MSLA oraz FFF.

4.7.7 Opis wykonania stacji badawczej

Stacja badawcza została wykonana z wykorzystaniem technik mieszanych prototypowania. W skład stacji weszły elementy wykonane w następujących technologiach:

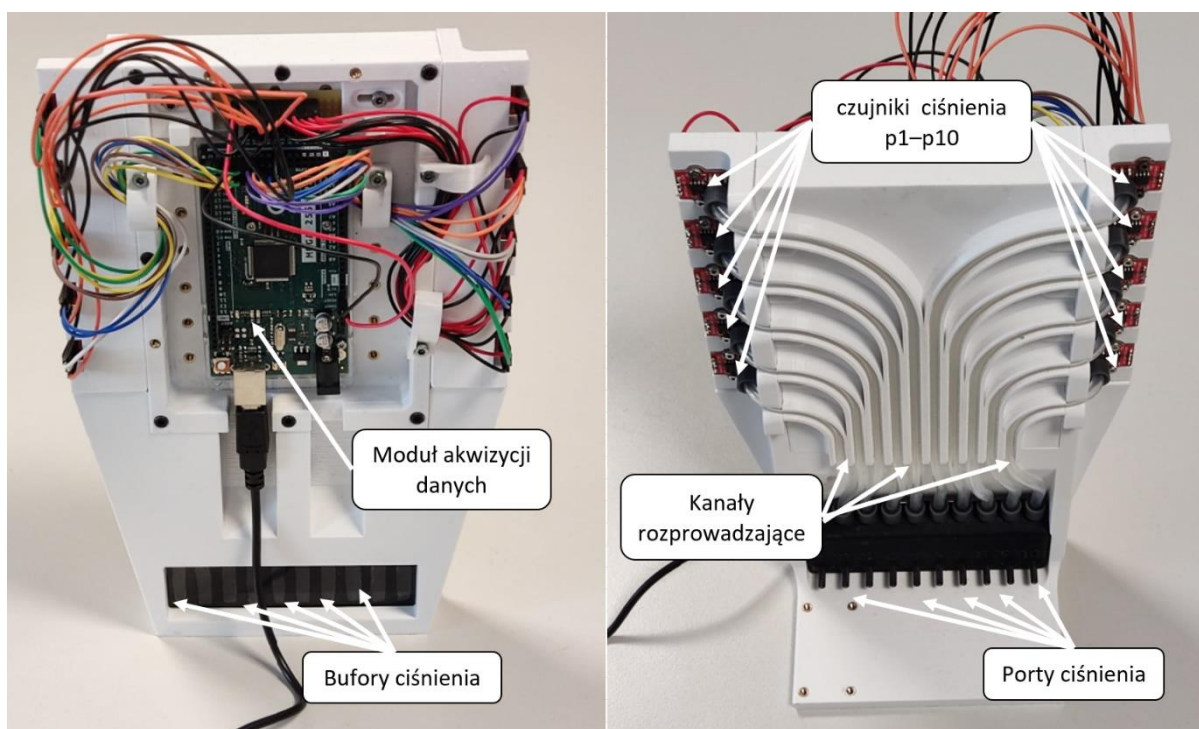
1. element główny podtrzymujący moduł akwizycji danych wykonany w technologii FFF, uwzględniający gniazda, w których osadzone termicznie zostały mosiężne gwinty M3 pozwalające na konfigurowalność urządzenia w dalszej fazie montażu oraz wymierzonej pozycji gwinty mosiężne M2 pozwalające na montaż modułu ATM2560 wg otworów montażowych, spełniający ponadto funkcję rozprowadzenia przewodów silikonowych ciśnienia do konstrukcyjnych pozycji czujników ciśnienia oraz umożliwiającą dostęp zasilania do modułu akwizycji danych;
2. ramka konstrukcyjna wykonana w technologii FFF z osadzonymi wkładkami gwintowanymi M3 dla montażu skrzydeł podtrzymujących czujniki HX710B oraz otworami przelotowymi M3 dla montażu ramki w wyznaczonej pozycji elementu głównego;
3. dwa skrzydła lustrzane osadzenia baterii czujników ciśnienia HX710B, wykonane w technologii FFF, o pięciokrotnym zagłębieniu definiowanych obrysów czujnika, dziesięciokrotnym gnieździe śrub montażowych czujników w wyznaczonych konstrukcyjnie pozycjach, podcięciach przyłączeniowych rastra czterokrotnych konektorów czujnika oraz geometrii przewidującej dopuszczalne bezpieczne promienie gięcia przewodów silikonowych ciśnienia w doprowadzeniu sygnału ciśnieniowego do czujników;
4. stojak elementów wykonany w technologii FFF, uwzględniający pozycje otworów przelotowych śrub montażowych M3, wizjer przewidziany dla kontroli poziomów cieczy dziesięciokrotnego buforu niwelującego ciśnienia kapilarne, uwzględniający ułożenie przewodów silikonowych

ciśnienia z zachowaniem bezpiecznych promieni gięcia oraz umożliwiającego bezkolizyjne podpięcie zasilania dla modułu akwizycji danych;

5. dziesięciokrotny bufor ciśnienia zamykany jednostronnie, wykonany w technologii MSLA z dociętym na wymiar wizjerem komór buforowych, uwzględniającym dwadzieścia 3 mm przyłączy przewodu ciśnienia – po 2 na krotność buforu;
6. elementy mocowania kabli i szyny wykonane w technologii FFF dla rozprowadzenia napięcia;
7. 30 sztuk pierścieni kompresyjnych dla przewodów ciśnienia w technologii SLA.

Integracja stanowiska została zrealizowana w głównej mierze za pomocą śrub M3, M2 oraz termicznie osadzanych gniazd gwintowanych. Elementy układu przewodów ciśnienia zostały wykonane z przewodu silikonowego, kompresowanego dedykowanymi pierścieniami wymuszającymi obwodową kompresję węża wokół króćców przyłączeniowych.

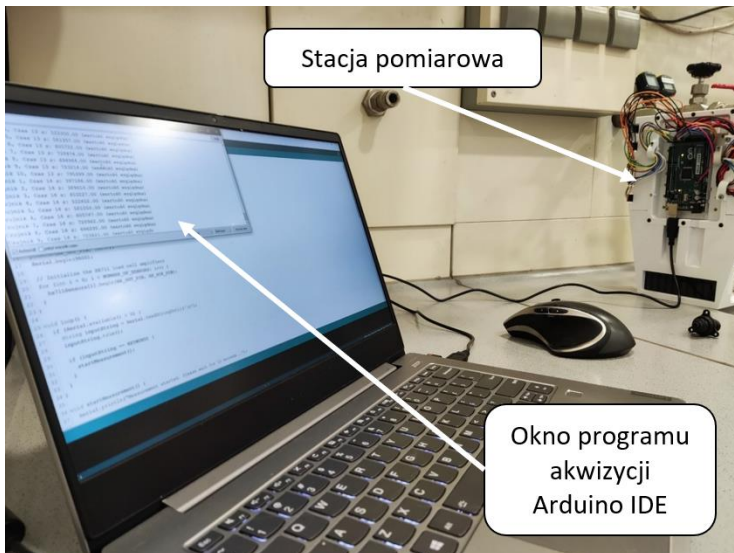
Stacja badawcza została przedstawiona na rys. 60.



Rys. 60 Zdjęcia stacji badawczej, z lewej: widocznej od strony modułu akwizycji danych, z prawej: widocznej od strony portów ciśnienia

Oprogramowanie stanowiska akwizycji danych zostało wykonane w uproszczonej wersji języka programowania C w aplikacji ArduinoIDE z pomocą narzędzia ChatGPT oraz udostępnionych w ramach licencji CC bibliotek dla przekaźnika ciśnienia HX710B.

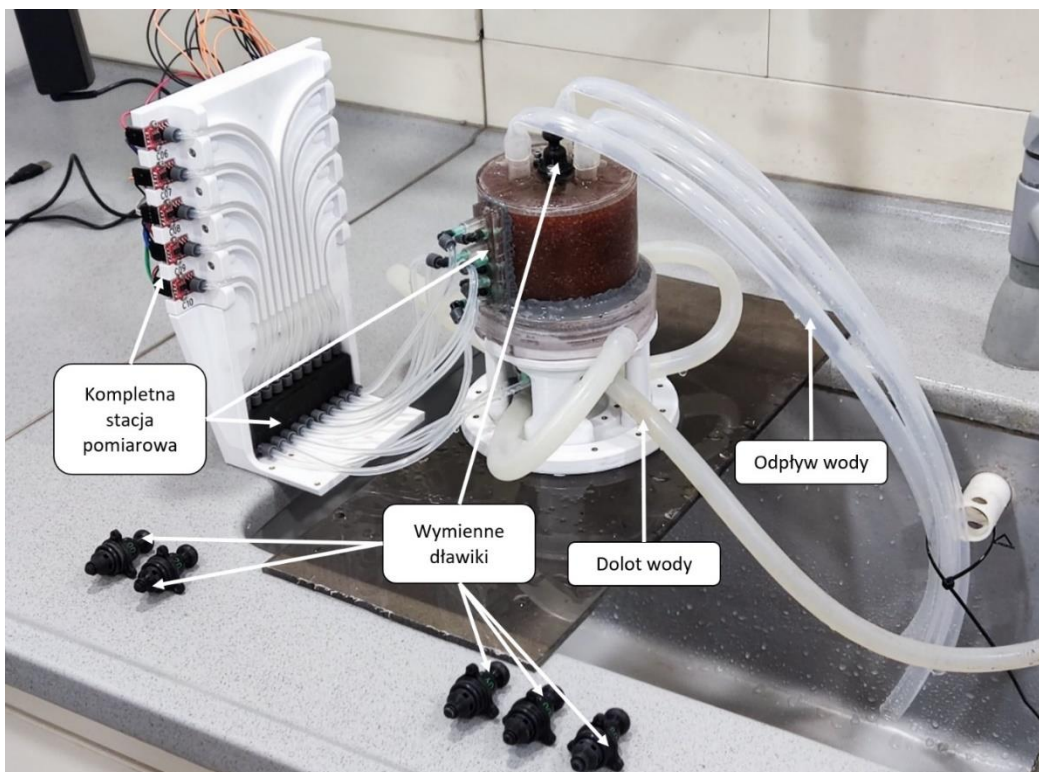
Zdjęcie wykonane podczas procesu akwizycji w trakcie testu empirycznego zbiornika geometrii docelowej zostało przedstawione na rys. 61.



Rys. 61 Zdjęcie wykonane podczas procesu akwizycji danych w trakcie testu empirycznego zbiornika geometrii docelowej

Logika zbierania danych zakładała cykliczne sczytywanie stanu wszystkich 10 czujników co 1 s przez czas 60 s.

Zdjęcie kompletnego systemu pomiarowego wraz z prototypem badawczym zostało przedstawione na rys. 62.



Rys. 62 Zdjęcie kompletnego stanowiska pomiarowego zmontowanego z urządzeniem testowym geometrii docelowej na stanowisku laboratoryjnym

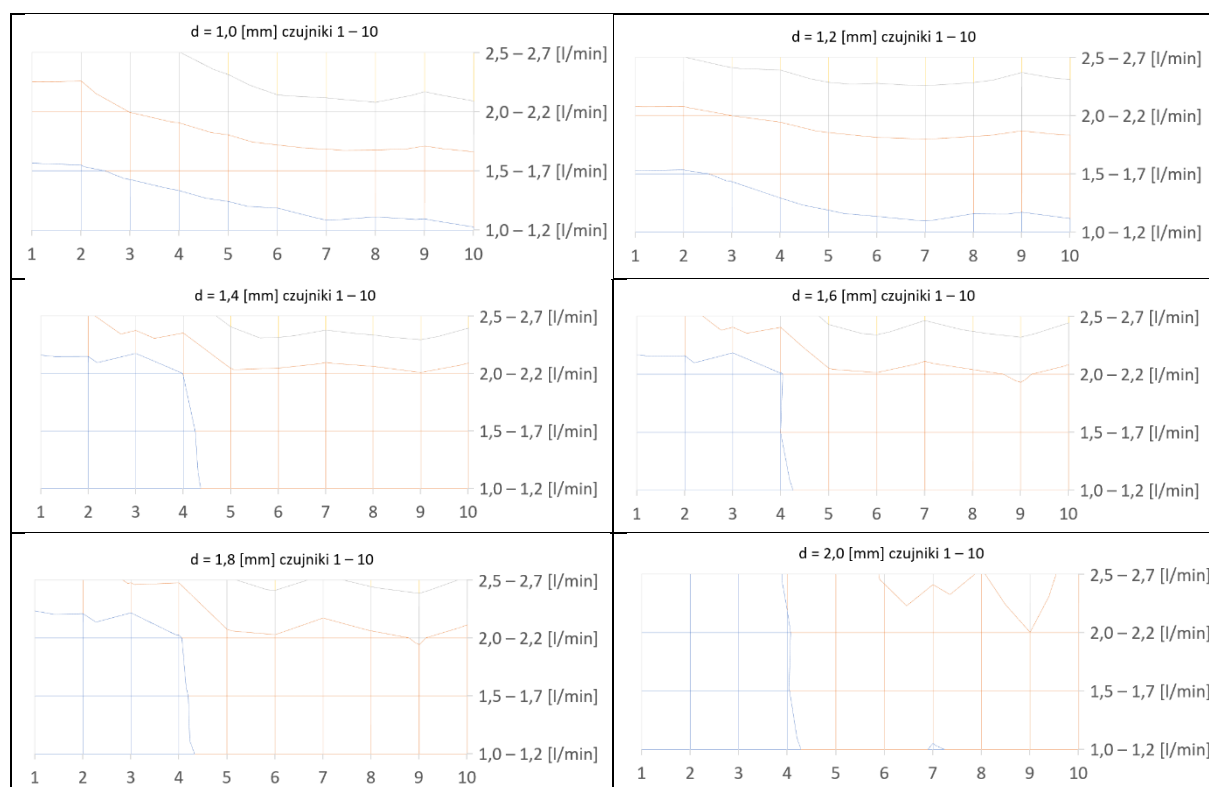
4.8 Omówienie wyników badania empirycznego dla strojenia modelu numerycznego CFD

W cyklu badania empirycznego zachowania ciśnienia bocznego strumienia przepływu filtracyjnego przeprowadzono zebranie danych dla 6 wariantów geometrii dławienia, każdy w funkcji zadanego ciśnienia przepływu na 4 poziomach 1,0–1,2 l/min, 1,5–1,7 l/min, 2,0–2,2 l/min oraz 2,5–2,7 l/min. Każdy punkt konfiguracji przepływu i geometrii dławienia zbierał 60 pomiarów ciśnienia na czujnik, które zostały uśrednione dla uzyskania wyniku pomiaru możliwie zbliżonego do stanu ustalonego przepływu oraz dla minimalizacji i analizy poziomu szumu czujników.

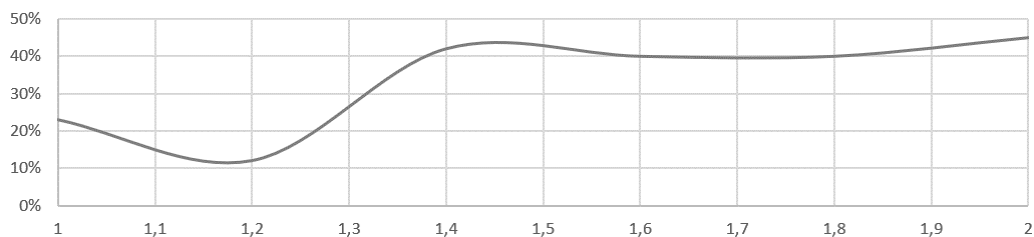
W efekcie zebrano 14 400 punktów pomiarowych, które zostały poddane analizie rozkładu pól poziomu sygnału.

Pola rozkładu średnich stanów czujników dla geometrii wymiaru dławienia w zakresie 1,0–2,0 mm oparte o pozyskane 14 400 punktów pomiarowych zostały przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1 Tabela wykresów pól rozkładu średnich stanów czujnika w funkcji zmiany przepływu dla różnych geometrii testowych



Wyniki zostały poddane również analizie średniego rozproszenia w postaci procentowej wartości odchylenia standardowego stanów sygnału populacji czujników w funkcji wymiaru dławienia – wykres średniej wartości parametru został przedstawiony na rys. 63.



Rys. 63 Wykres średniego rozproszenia sygnału – odchylenia standardowego populacji punktów pomiarowych w funkcji wymiaru dławienia

Wstępne wnioski badania empirycznego pozornie wskazywały okolicę wymiaru dławienia 1,2 jako minimum lokalne rozproszenia prędkości przepływu w punktach pozycji czujników, korelującej z ciśnieniem strumienia bocznego, jednak efekt empiryczny mógł być powiązany ze spadkami ciśnienia sieciowego, obserwowanego szczególnie w mapach ciśnienia dla niskich wartości objętościowych przepływu – efekt szczególnie widoczny jest na mapach pomiarowych dla średnic 1,4 mm oraz 1,6 mm.

Z uwagi na brak możliwości zapewnienia stabilności ciśnienia pomiarowego w wykorzystanym układzie dane pozyskane z punktów pomiarowych nie zostały wykorzystane do bezpośredniej próby definiowania optimum – wartości uśrednione stanu poszczególnych czujników zostały w puli 240 punktów uśrednionych wykorzystane jako parametr korelacyjny stanu empirycznego przepływu ze strojonym modelem CFD zbiornika docelowego.

4.9 Opis badania CFD strojonego modelu symulacyjnego Ansys Fluent

4.9.1 Strojenie modelu przepływu w ciele porowatym

Badanie strojenia przepływu w ciele porowatym zostało wykonane w oparciu o migrowany do środowiska Ansys Fluent, skorygowany o niedoskonałości wymiarowe zawężenia wewnętrznych średnic wykonawczych cylindra model CAD zbiornika pomiaru referencyjnego oporu hydraulicznego stawianego przez żywicę. Wewnętrzna średnica zbiornika została pomniejszona o 0,8 mm z uwagi na zmierzony przy zasypywaniu żywicy, nieprzewidziany uprzednio skurcz obwodowy zbiornika podczas procesu utwardzania żywicy światłoutwardzalnej.

W pierwszej kolejności skorygowany wymiarowo model w formacie STEP został zaimportowany do środowiska Ansys Space Claim, w którym w oparciu o geometrię zamykającą przepływ oraz zdefiniowane powierzchnie przekrojowe wlotu i wylotu zbiornika zdefiniowana została domena obliczeniowa płynu.

Domena obliczeniowa została podzielona na 3 strefy: wlotową (*pre-resin*), żywicy (*resin*) i wylotową (*post-resin*). Z uwagi na brak konieczności analizy zjawisk dotyczących bryły obudowy oraz dysków deflekcyjnych fragmenty niebędące częściami domeny płynu zostały wykluczone z procesowania w modułach fizycznych (*suppressed for physics*).

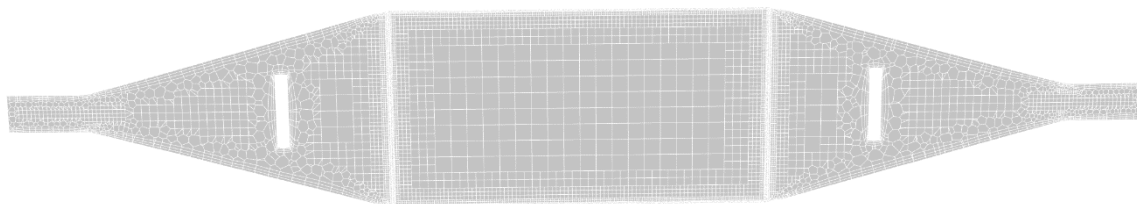
Widok domeny płynu wraz z wykluczonymi obszarami bryły obudowy został przedstawiony na rys. 64.



Rys. 64 Widok domeny obliczeniowej bryły strojenia oporu filtra oraz geometrii wykluczonej z obliczeń, opracowane w programie Ansys Space Claim

W ten sposób przygotowana geometria została zaimportowana do oprogramowania Ansys Fluent w module Meshing celem utworzenia siatki. Utworzono siatkę typu *poly-hexcore* dla trzech opisanych stref przepływu o całkowitej liczbie komórek 2 581 668, z czego 2 255 957 przydzielone zostało dla strefy żywicy.

Widok przekroju domeny siatki został przedstawiony na rys. 65.



Rys. 65 Widok przekroju siatki domeny obliczeniowej bryły strojenia oporu filtra – widok programu Ansys Fluent modułu Meshing

Z uwagi na stochastyczny charakter równań opisujących spadki ciśnienia w przepływie przez ciało porowate, wysokie zagęszczenie komórek oraz pomijalny wpływ efektów przyściennych na zachowanie spadku hydraulicznego w urządzeniu rozważanej skali wymiarowej, dla zbiornika kalibracyjnego spadków hydraulicznych ciała porowatego nie została wykonana analiza typu MIS (*mesh independence study*).

Tak przygotowaną siatkę wyeksportowano do modułu Solution oprogramowania Ansys Fluent, w którym zdefiniowano zakres parametrów pracy zbiornika dla możliwie dobrego odwzorowania zachowania.

W oparciu o stan wiedzy[99] dobrano parametr modelu rozproszenia energii w modelu lepkościowym równań przepływu jako SST K-omega jako najlepiej odwzorowujący lepkościowe straty energii w modelach tej skali przepływów i wymiaru.

Zdefiniowano parametr zadanego przepływu objętościowego dla wlotu jako wlot definiowany masą strumienia (*mass-flux-inlet*); wylot został opisany jako wylot ciśnieniowy (*pressure-outlet*) z ciśnieniem zdefiniowanym jako ciśnienie atmosferyczne – brak nadciśnienia przeciwdziałającego przepływowi, analogicznie do zastosowanego układu pomiarowego z odpływem swobodnym.

Dla modułu mediów przyjęto prekonfigurowany w oprogramowaniu zestaw cech wody w stanie ciekłym (*liquid-h2o*), przypisanym dla wszystkich części domeny.

Do obliczeń danych przyjęto ciało o 100% porowatości (dla zachowania pełnej elastyczności modelu CFD Ansys Fluent, wg wytycznych Ansys Fluent).

Zgodnie z wytycznymi podręcznika Ansys[100] wyrażenie dla korelacji spadku ciśnienia dla złoża porowatego upakowanego z równania Erguna wynika następująca zależność:

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} v_s + \frac{1,75\rho(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} v_s^2 \quad (6)$$

μ – dynamiczny współczynnik lepkości płynu ($\mu = 0,001306$ [Pa · s])

ρ – gęstość płynu ($\rho = 997$ [$\frac{kg}{m^3}$])

D_p – średni wymiar ziarna

L – długość złoża ($L = 0,1$ [m])

ε – udział przestrzeni anularnej (porowatość) ($\varepsilon = 0,36$ [-])

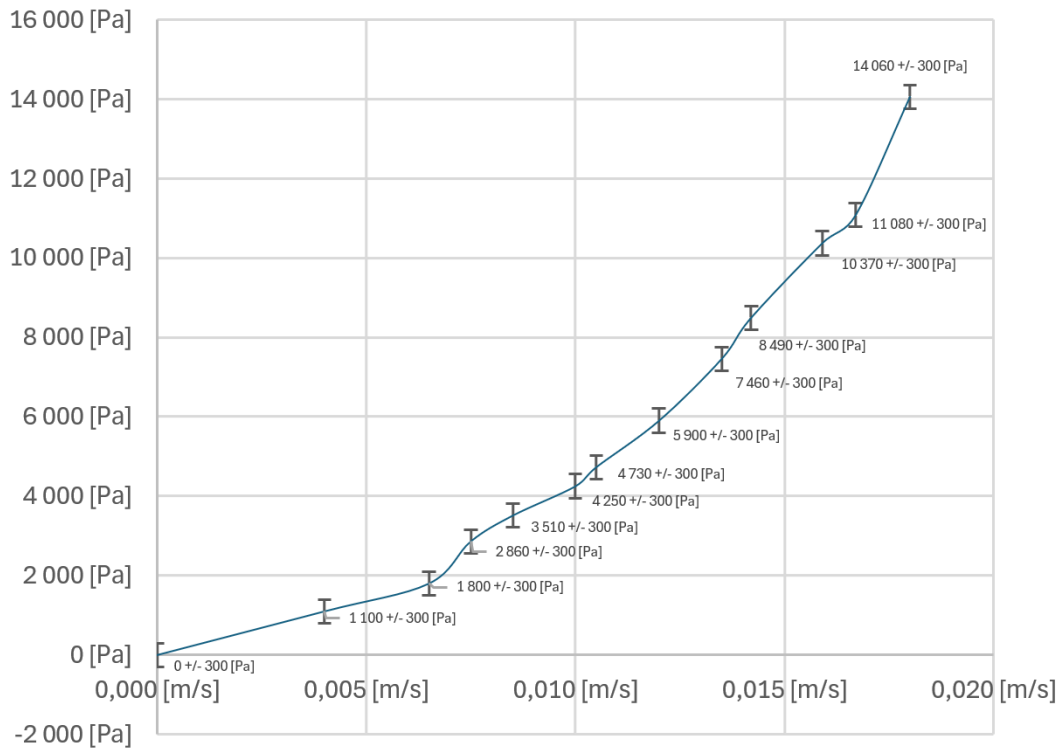
v_s – prędkość uśredniona powierzchniowa v_s – prędkość uśredniona powierzchniowa

A – powierzchnia przekroju kolumny ($A = 0,005$ [m²])

Transformacja równania Erguna w funkcji długości złoża testowego L:

$$|\Delta p| = \frac{150\mu L(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} v_s + \frac{1,75\rho L(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} v_s^2 \quad (7)$$

Wyniki badań przeciwcisnienia pozyskane w ramach testu empirycznego spadku hydraulicznego w prototypie badawczym w funkcji zadanego przepływu objętościowego pozwalają na dopasowanie metodą regresji liniowej wartości ciśnienia zmierzonego jako funkcji kwadratowej uśrednionej powierzchniowej prędkości liniowej dla zadanych warunków geometrycznych. Wykres zachowania zmierzonego ciśnienia w funkcji kalkulowanej powierzchniowej prędkości liniowej (*superficial velocity*) został przedstawiony na rys. 66.



Rys. 66 Wykres zmierzonego poziomu ciśnienia przed wlotem do zbiornika w funkcji prędkości liniowej przepływu w kolumnie testowej

Bazując na równaniu krzywej dopasowanej metodą regresji dla funkcji ciśnienia od kalkulacyjnej wartości prędkości liniowej w osi przepływu dla przyjętej 100% porowatości (wartość przeliczeniowa wg wytycznej podręcznika Ansys Fluent), uzyskujemy równanie:

$$|\Delta p| = 83689,81 \cdot v_s + 34622124,12 \cdot v_s^2 \quad (8)$$

Następnie przyjęto definicję źródła w oparciu o uproszczone równanie zachowania pędu przepływu, zgodnie z wytycznymi Ansys:

$$\nabla p = S_i \text{ or } \Delta p = -S_i L \quad (9)$$

A dla ciała porowatego jednorodnego:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_s + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_s\right) \quad (10)$$

gdzie

Δp – uzyskany spadek ciśnienia w geometrii

S_i – source term source term oprogramowania Ansys Fluent

$\frac{\mu}{\alpha} v_s$ – człon straty lepkościowej wg Darcy'ego

$C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_s$ – człon straty bezwładnościowej

Przez substitucję zdefiniowano parametry źródła dla Ansys Fluent jako:

$$a \cdot v_s + b \cdot v_s^2 = \frac{\mu}{\alpha} v_s L + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_s L \quad (11)$$

gdzie wyniki pozyskane z badania przekształconego w pierwszej części przeliczenia (funkcja krzywej dopasowanej regresją) pozwoliły wyznaczyć:

$$a = 83689,81$$

$$b = 34622124,12$$

gdzie

$$\alpha = \frac{\mu L}{a} \quad (12)$$

i

$$C_2 = \frac{2b}{\rho L} \quad (13)$$

Przeliczono wyniki pomiaru empirycznego, uzyskując parametr strojenia charakterystyki jonitu dla oprogramowania symulacyjnego Ansys Fluent:

$$\alpha = 0,000000002263 [m^2]$$

α – całkowita przepuszczalność (parametr absolute permeability)

$$C_2 = 478\,983,49 [m^{-1}]$$

C_2 – opór bezwładnościowy (parametr interial resistance)

Tak uzyskane wartości dostrojonego modelu numerycznego spadku ciśnienia zostały wprowadzone jako parametr opisowy warunków pracy strefy komórek domeny przepływu (*cell zone condition – fluid – resin*) – część domeny została opisana jako strefa porowata (*porous zone*).

Z uwagi na konieczność wprowadzenia formuł w formie odwrotności całkowitej przepuszczalności oraz niezmiennego obliczeniowo parametru oporu bezwładnościowego ostateczne parametry ciała porowatego zostały określone jako

$$\frac{1}{\alpha} = 441938533,03 [m^{-2}]$$

$$C_2 = 478\,983,49 [m^{-1}]$$

Z uwagi na izotropowy charakter złoża składającego się z żywicznych ziaren kulistych upakowanych w sposób losowy parametry formuł strat ciśnienia jako funkcji prędkości przepływu przez złożo zostały przyjęte jako tożsame dla wszystkich trzech osi modelu. Porowatość bryły została zdefiniowana jako 100% (1 [-]), analogicznie do modelu obliczeniowego.

Okno zdefiniowanych parametrów formuł oporu przepływu przez filtr zostało przedstawione na rys. 67.

Zone Name
resin

Material Name water-liquid Edit...

Frame Motion 3D Fan Zone Source Terms

Mesh Motion Laminar Zone Fixed Values

Porous Zone

Reference Frame Mesh Motion **Porous Zone** 3D Fan Zone Embedded LES Re

Conical

Relative Velocity Resistance Formulation

Viscous Resistance (Inverse Absolute Permeability)

Direction-1 [m²] 441938533.03

Direction-2 [m²] 441938533.03

Direction-3 [m²] 441938533.03

Inertial Resistance

Alternative Formulation

Direction-1 [m⁻¹] 478983.49

Direction-2 [m⁻¹] 478983.49

Direction-3 [m⁻¹] 478983.49

Rys. 67 Okno definicji parametrów ciała porowatego domeny obliczeniowej, Ansys Fluent

4.9.2 Analiza niezależności siatki modelu docelowego

Opracowanie modelu docelowego do celów badania rozkładów statystycznych lokalnych prędkości komórek modelu obliczeniowego wymagało weryfikacji wpływu rozdzielczości siatki symulacyjnej na obliczenia dyskretne zachowania płynu w domenie, zwanej z ang. *mesh independence study* (MIS).

W pierwszej kolejności w oparciu o opracowany w środowisku CAD – SolidWorks model reprezentacyjny prototypu badawczego geometrii docelowej z pomocą oprogramowania Ansys SpaceClaim przygotowana została geometria domeny obliczeniowej, pozwalająca na wydzielenie obszarów o różnych parametrach domeny przepływu – obszaru swobodnego przepływu przed wymiennikiem jonowym i sitem radialnym (*pre-resin*), obszaru geometrii wymiennika jonowego (*resin*) oraz obszaru kolektora odpływowego (*post-resin*).

Geometria stref domeny obliczeniowej przepływu została wydzielona w oparciu o powierzchnie modelu wyznaczające granice pułapki żywicy.

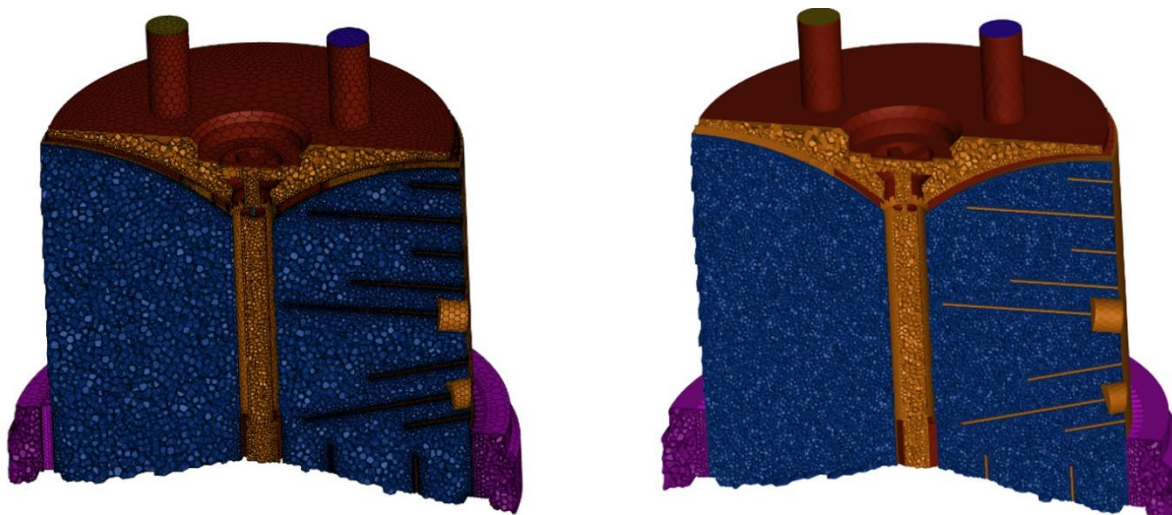
Ponadto w ramach przygotowania geometrii modelu wyznaczono geometrie funkcjonalne odpowiadające:

1. trzem przekrojom kołowym króćców wlotowych (*inlet-1/inlet-2/inlet-3*);
2. trzem przekrojom kołowym króćców wylotowych (*outlet-1/outlet-2/outlet-3*);
3. dziesięciu punktom pomiarowym w punktach szczytowych igieł czujnika (p1–p10).

Z uwagi na fakt, że jednym z głównych kryteriów dokładności analizy statystycznej rozkładu jest rozmiar próbki, konieczne było znalezienie zakresu gęstości siatki dla obszaru żywicy, która przy zachowaniu możliwie dużej jednorodności siatki, dla minimalizacji różnic wag objętości poszczególnych komórek w analizie rozkładu prędkości w populacji całości komórek, zagwarantowałaby wystarczającą rozdzielczość dla dokładnego odwzorowania obszarów krytycznych znajdujących się w obszarach sit wlotowych i wylotowych i pozwoliłaby na zachowanie efektywności czasowej symulacji.

W oparciu o obserwację zachowania zagęszczenia siatki w obszarach krytycznych przy analizie zakresu liczby komórek obliczeniowych od ok. 300 tys. do ok. 1,5 mln przyjęto wstępnie, że liczba komórek będzie spełniała powyższe kryteria dla wartości ok. 1 mln.

Wizualizację siatkowania przeciętego modelu w wariantach liczby komórek obszaru żywicy na poziomie ok. 400 tys. oraz 1 mln przedstawiono na rys. 68:



Rys. 68 Zestawienie przekroju siatkowego geometrii obliczeniowej na poziomie 400 tys. (po lewej) oraz 1 mln (po prawej)

Na potrzeby analizy w oparciu o jedną geometrię dławienia przygotowaną w aplikacji Ansys SpaceClaim przygotowano trzy punkty symulacyjne, dla których ocenie poddana została zmiana dwóch parametrów symulacyjnych w funkcji zagęszczenia siatki – zdefiniowano zgodnie ze stanem wiedzy dotyczącym doboru parametrów kalibracji analizy MIS oraz wcześniejszymi badaniami[99]:

1. parametr całkowitego spadku ciśnienia w przepływie przez zbiornik;
2. całkę objętościową parametru prędkości *velocity-magnitude* dla strefy (*resin*).

Jako punkty symulacji oceny wpływu zagęszczenia siatki na jakość wyników (MIS) przyjęto następującą licznosc komórek obszaru *resin*:

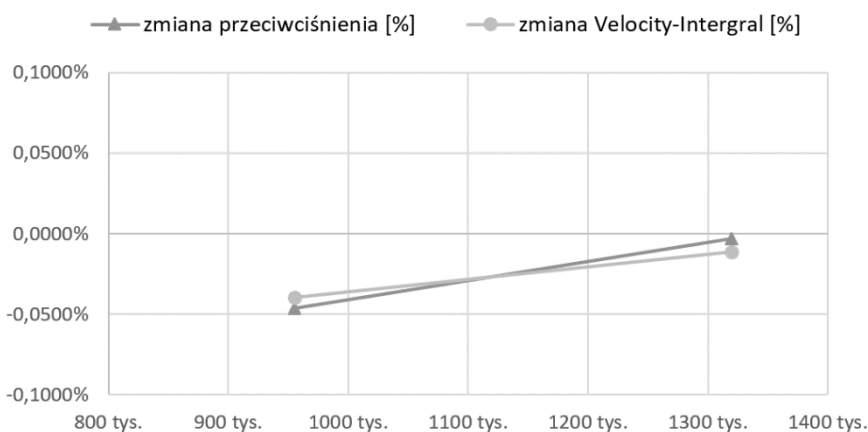
1. 852 tys.;
2. 955 tys.;
3. 1320 tys.

Analiza MIS wykazała liczbę 955 tys. komórek obszaru filtra jako wystarczającą dla uniezależnienia wyniku symulacyjnego od zagęszczenia siatki przy wartości zmiany poszczególnych parametrów na poziomie <0,015% dla obu sprawdzanych parametrów. Wyniki szczegółowe analizy niezależności siatki zostały przedstawione w tab. 2, wykresy zmiany wyników przedstawiono na rys. 69–70.

Tab. 2 Wyniki szczegółowe analizy niezależności wyników symulacji od zagęszczenia siatki (analiza MIS)

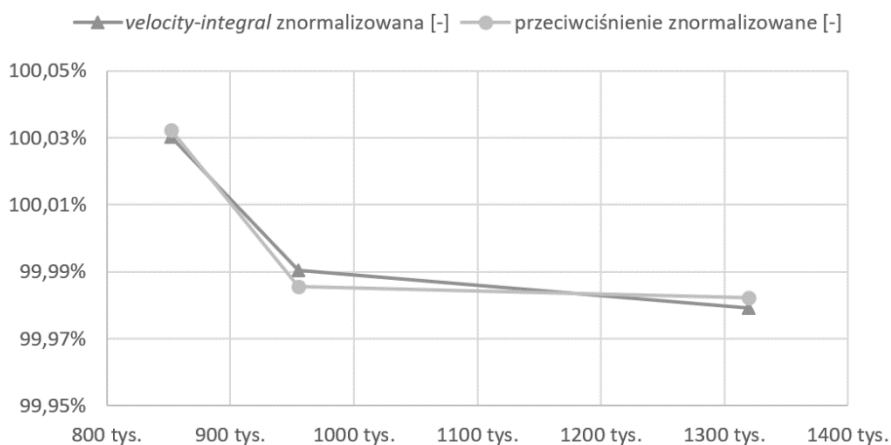
liczba komórek (<i>resin</i>) [tys.]	Prędkość (<i>velocity-integral</i>)	Prędkość (<i>velocity-integral</i>) znormalizowana	przeciwiścienie [Pa]	zmiana VI [-]	przeciwiścienie znormalizowane [-]	zmiana P [-]
852	0,001205883	100,0302%	224,36197	-	100,0322%	-
955	0,001205405	99,9906%	224,2574006	-0,0396%	99,9856%	-0,0466%
1320	0,001205268	99,9792%	224,2498312	-0,0113%	99,9822%	-0,0034%

Zmiana parametrów względem niższego kroku zagęszczenia



Rys. 69 Wykres procentowej zmiany wartości symulowanego parametru względem niższego kroku zagęszczenia

Stosunek wartości dla kroku do średniej zakresu wartości

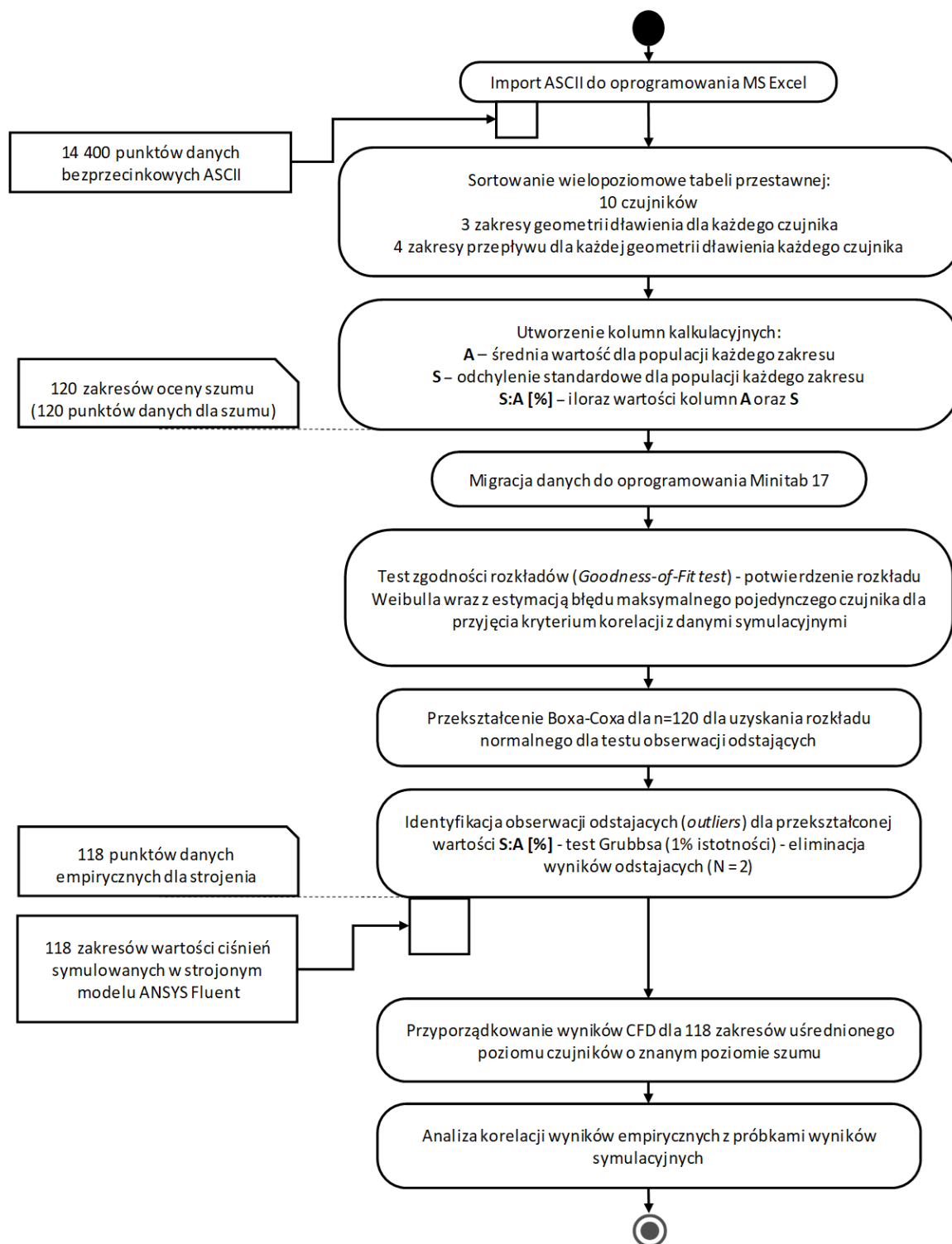


Rys. 70 Wykres ilorazu wartości obliczonej dla kroku zagęszczenia do średniej wartości obliczonej dla wszystkich badanych w MIS zakresów zagęszczenia

4.9.3 Analiza korelacji wyników symulacyjnych wariantów modelu docelowego z badaniem empirycznym

Ostatnim etapem weryfikacji zdolności cyfrowego odwzorowania modelu rzeczywistego dla odwzorowania rzeczywistego zachowania przepływu wewnątrz ciała porowatego jonitu był cykl korelacji stanów czujników p1–p10 pozyskanych w ramach serii badań empirycznych ze stanami punktów pomiarowych p1–p10 środowiska CFD Ansys Fluent, dla potwierdzenia odwzorowania rozkładów zachowania wewnątrz żywicy.

Ogólny schemat postępowania w analizie korelacji został przedstawiony na rys. 71.



Rys. 71 Ogólny schemat postępowania wykorzystany w wykonanej analizie korelacji wyników symulacyjnych do wartości zmierzonych w teście empirycznym geometrii docelowej

Pierwszym krokiem analizy korelacji czujników była weryfikacja poprawności zachowania poszczególnych czujników w ramach testów – weryfikacja, czy w procesie testu empirycznego pojawiły się punkty pomiarowe o istotnie odstających wartościach stanu czujnika, mogące wskazywać na błędy pomiarowe

wynikające np. z konstrukcji czujników lub rozszczelnienia układu pomiarowego, które mogło zostać niezauważone podczas testu.

Dla przeprowadzenia analizy korelacji w pierwszej kolejności konieczne było przeanalizowanie pola statystycznego zachowania czujników – oceniono, czy rozkład szumu czujników, rozumiany jako procentowy stosunek odchylenia standardowego populacji wyników poszczególnych punktów pomiarowych do średniej wartości każdego z 240 punktów pomiarowych, odzwierciedla przewidywany dla takiego rodzaju zjawiska rozkład gęstości prawdopodobieństwa.

Z uwagi na charakter matematyczny wskaźnika rozproszenia, jakim jest odchylenie standardowe, oczekiwanym rozkładem prawdopodobieństwa zachowania tak zdefiniowanego pola szumu był rozkład Weibulla.

Z puli wyników pomiaru empirycznego wytypowano pulę geometryczną odpowiadającą wstępnemu zakresowi geometrii symulowanych – wytypowano geometrie dławienia 1,2 mm, 1,4 mm oraz 1,6 mm.

Z pomocą oprogramowania MS Excel (narzędzie: tabela przestawna) z puli 14 400 punktów pomiarowych wysortowano 3 poziomy danych – numer czujnika, zakresy geometrii dla każdego z czujników, zgodnie z typowaniem oraz zakres eksperymentalnego przepływu.

Uzyskując w ten sposób pulę 120 rzędów tabelarycznych, z których każdy odpowiadał 60 próbkom pomiarowym stanu czujnika w określonej geometrii dławienia, pozycji czujnika i określonych warunków przepływu przez zbiornik, zdefiniowano parametry tabeli przestawnej tak, aby dla każdego rzędu tabelarycznego zostały wyświetlone wartości:

1. średniej wartości dla 60 próbek pomiarowych czujnika w każdej ze 120 konfiguracji z osobna (A);
2. odchylenia standardowego populacji dla każdej ze 120 konfiguracji (S);
3. ilorazu wartości poprzednich punktów – S:A wyrażonej jako wartość procentowa.

Otrzymany w ten sposób rozkład stosunków wartości odchylenia standardowego do średniej wartości stanu czujnika dla poszczególnych konfiguracji dały pulę 120 procentowych wartości odchylenia czujnika, dla zmiennego zakresu parametrów pomiarowych, zachowującą bezwymiarowy charakter opisu szumu.

Dane otrzymane w wyniku powyższego procesu na następnym etapie poddane zostały migracji do środowiska oprogramowania analizy statystycznej Minitab 17.

W oprogramowaniu statystycznym poddano analizie rozkładu pulę próbek wartości S:A [%] dla doboru metody właściwej dla statystycznego określenia wyników odstających.

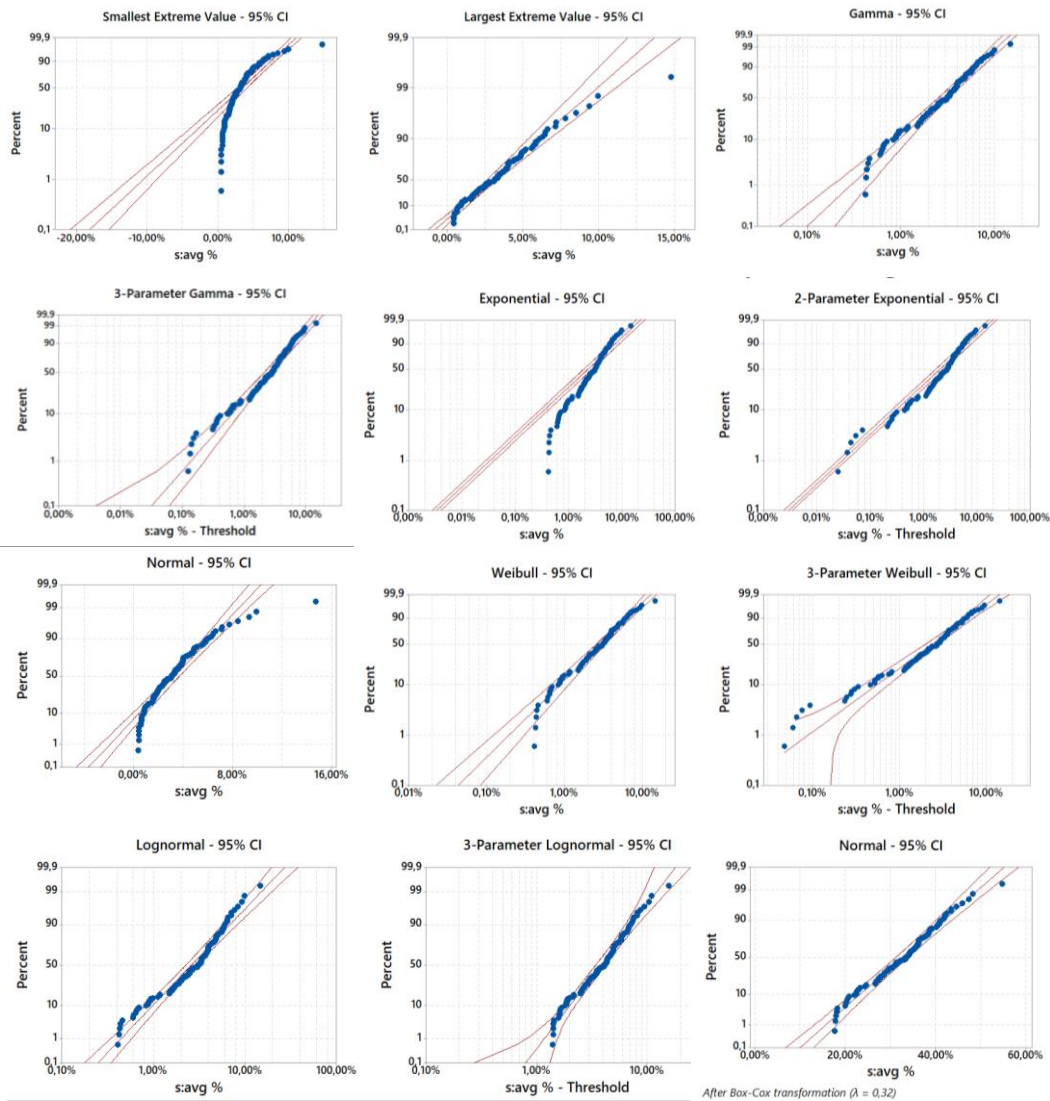
Próbka została poddana analizie porównawczej przyporządkowanych modeli rozkładu prawdopodobieństwa (*goodness-of-fit test*), w którym otrzymano szereg wyników testu dopasowania Andersona–Darlinga.

Wyniki testu dopasowania wraz z wartościami p (lub LRT p) przedstawione zostały w tab. 3.

Tab. 3 Wyniki testu dopasowania rozkładów Andersona–Darlinga do puli próbek S:A [%]

Distribution	AD	P	LRT P
Normal	2,000	<0,005	
Box-Cox	0,475	0,236	
Lognormal	1,727	<0,005	
3-Parameter Lognormal	0,567	*	0,015
Exponential	6,489	<0,003	
2-Parameter Exponential	3,101	<0,010	0,000
Weibull	0,358	>0,250	
3-Parameter Weibull	0,814	0,038	0,017
Smallest Extreme Value	9,342	<0,010	
Largest Extreme Value	0,414	>0,250	
Gamma	0,478	0,249	
3-Parameter Gamma	0,902	*	0,234
Logistic	1,043	<0,005	
Loglogistic	1,322	<0,005	
3-Parameter Loglogistic	0,658	*	0,098

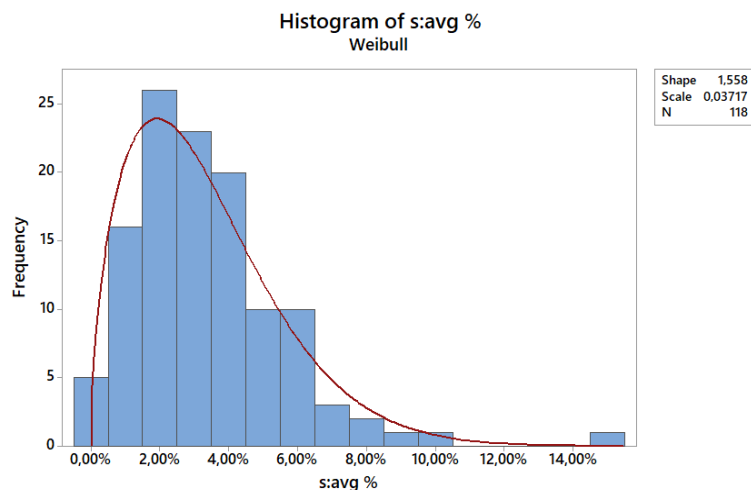
Wizualną reprezentację wykresów prawdopodobieństwa dopasowania pola danych do poszczególnych rozkładów przedstawiono na rys. 72.



Rys. 72 Wykresy prawdopodobieństwa dopasowania pola danych dla testowanych modeli rozkładu

Wynik analizy dopasowania rozkładów wskazał, że dla wykonania testu na wyniki odstające (*outliers test*) konieczne było wykonanie przekształcenia rozkładu do rozkładu normalnego. Do przekształcenia wykorzystana została metodą Boxa–Coxa. Dla przekształconej puli danych, z uwagi na licznosc populacji przekraczającą 20, jako test na wytypowanie obserwacji odstających wykonano test Grubbsa, który wskazał, że wartość S:A [%] na poziomie 36% (2 przypadki, 2 konsekwentne testy) jest wartością odstającą. Z uwagi na wskazanie obu wyników odstających jako wyników bezpośrednio następujących po sobie w czasie oba wyniki zostały wyeliminowane z puli w związku z podejrzeniem błędu w pomiarze. Najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem takich wyników odstających może być przypuszczenie częściowego rozszczelnienia układu czujnika podczas zbierania danych z wytypowanych dwóch punktów pomiarowych.

Dopasowanie krzywej rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla dla histogramu danych weryfikacyjnych N = 118 przedstawiono poniżej: na rys. 73.

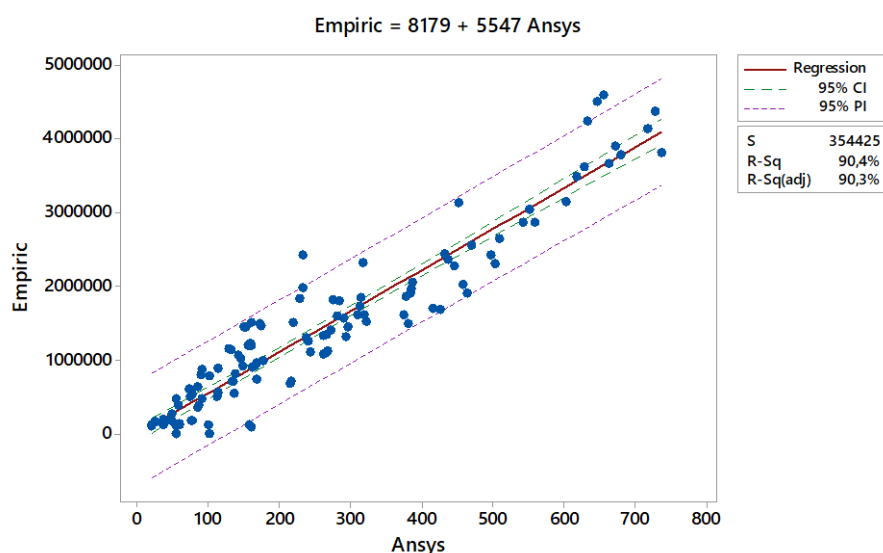


Rys. 73 Histogram danych pomiarowych po eliminacji wartości odstających z dopasowanym rozkładem Weibulla

W oparciu o uzyskany rozkład szumów czujników wnioskowano o wymaganym poziomie procentowym dla testu korelacyjnego dopasowania wyników punktów pomiarowych modelu symulacyjnego CFD środowiska Ansys Fluent. Wartość możliwego dopasowania korelacji z uwagi na obserwowany wysoki poziom szumu czujników zdefiniowano jako 90%.

W następnym kroku dla pozyskanej tabeli punktów danych stanów czujnika $N = 118$ przyporządkowano analogiczne punkty pomiarowe dla wyników ciśnienia całkowitego pozyskanych ze zdefiniowanych w modelu symulacyjnym Ansys Fluent punktów pomiarowych p1–p10, odpowiadających geometrycznie pozycjom wlotów igieł pomiarowych p1–p10 w ramach testu empirycznego mierzącego stan czujnika wynikający z ciśnienia bocznego strumienia filtracji.

Wykresy korelacji stanów czujnika sond p1–p10 z ciśnieniami punktów p1–p10 modelu CFD przedstawiono na rys. 74:.



Rys. 74 Wykres korelacji stanu czujnika sond p1–p10 z ciśnieniami p1–p10 symulacji Ansys Fluent, korelacja metodą regresji liniowej

Analiza dopasowania danych metodą regresji liniowej dla dobranych parametrów kalibracyjnych modelu CFD pokazała współczynnik dopasowania do wyników empirycznych na poziomie 90,3%, czyli spełniający

kryterium zdefiniowane na etapie oceny błędu wynikającego z szumu czujników. Współczynnik korelacji Pearsona dla uzyskanych wyników wyniósł $r = 0,951$, potwierdzając silną korelację modelu CFD.

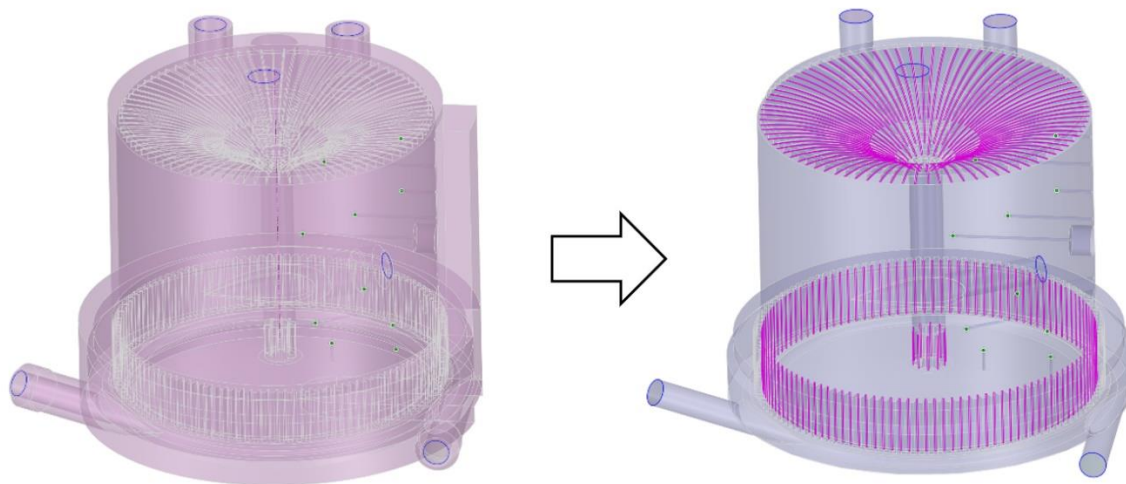
4.9.4 Metodyka pozyskania wyników rozkładu statystycznego prędkości w objętości złoża

Analiza korelowana rozkładu prędkości w ramach modelu CFD wymagała opracowania metody pozyskania miary rozproszenia parametru wartości wypadkowej wektorów prędkości przepływu (*velocity magnitude*) dla objętości symulowanej filtra jonitowego modelu CFD Ansys Fluent.

W oparciu o model CFD, którego parametry kalibracyjne funkcji straty ciśnienia w przepływie przez filtr oraz którego reprezentacyjne punkty pomiarowe p1–p10 zostały skorelowane z rzeczywistymi pomiarami zachowania stanów czujników mierzących ciśnienie boczne strumieni przepływu filtracyjnego w jonicie, przygotowano serię modeli o zróżnicowanej geometrii wymiaru dławienia kanału centralnego.

W ramach dobranego zakresu wymiarów symulowanych zachowania przyjęto skok wymiaru dławienia jako 0,1 mm, w zakresie testowym 1,2–1,6 mm. Przygotowano tym samym 5 siatkowanych geometrii testowych odpowiadających geometrycznie modelowi testowanemu empirycznie.

W pierwszym kroku, w oprogramowaniu Ansys SpaceClaim, w oparciu o opracowany w oprogramowaniu SolidWorks model złożeniowy CAD zbiornika, wyznaczona została domena obliczeniowa dla objętości płynu wewnątrz zbiornika o wymiarze początkowym dławienia na poziomie 1,2 mm poprzez wskazanie krawędzi otworów cylindrycznych wlotów i wylotów zbiornika z pomocą funkcji Volume Extract, co przedstawiono na rys. 75.



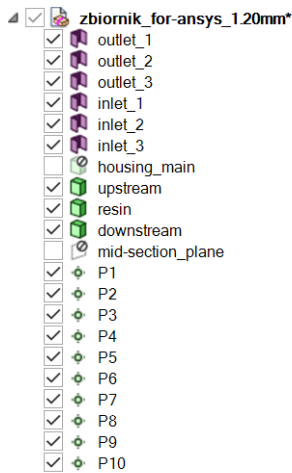
Rys. 75 Wizualizacja modelu wyjściowego i bryły domeny obliczeniowej Ansys SpaceClaim w wyniku operacji Volume Extract

Domena obliczeniowa została podzielona logicznie na 3 obszary przy pomocy powierzchni geometrycznych styknego przedłużenia ścian zawierających szczeliny sitowe przeznaczone do utrzymywania jonitu w objętości. Dodano również płaszczyznę referencyjną centralnej do celów wizualizacji.

Następnie w funkcji pozycji geometrycznej czujników ciśnienia w postaci igieł dodane zostały punkty p1–p10, wykorzystywane do kalibracji modelu z systemem empirycznym referencyjnym.

W kolejnym kroku zastosowano logikę współdzielenia geometrii powierzchni podziałowych brył domeny obliczeniowej (części odpowiadające powierzchniom największego przewężenia sit jonitu).

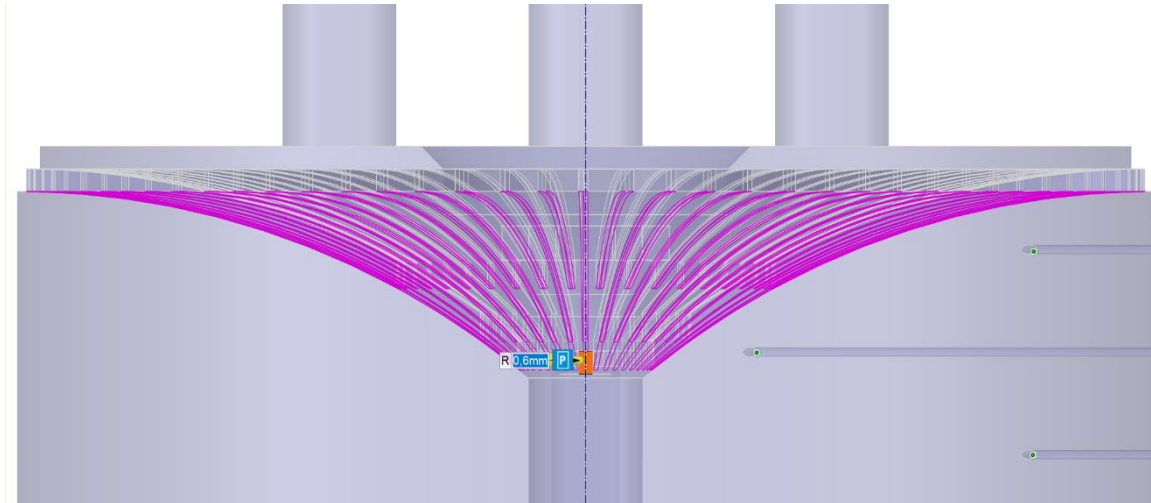
W ostatnim kroku przygotowania bryły bazowej zastosowano zablokowanie bryły obudowy oraz płaszczyzny referencji centralnej w module obliczeniowym (*suppress-for-physics*), co przedstawiono na rys 76.



Rys. 76 Wizualizacja drzewa geometrii modelu symulacyjnego geometrii docelowej oprogramowania Ansys SpaceClaim

Tak przygotowany model bryłowy został zapisany jako plik .SCDOC w dedykowanym dla wariantu symulacyjnego 1,20 mm geometrii dławienia folderze.

W następnym kroku przygotowania przekroju zakresu symulacyjnego geometrii model został poddany modyfikacjom krokowym wymiaru dławienia z pomocą funkcji *pull*, zwizualizowanej na rys. 77.



Rys. 77 Wizualizacja funkcji *pull* dla geometrii dławienia modelu symulacyjnego geometrii docelowej oprogramowania Ansys SpaceClaim

Każdorazowa modyfikacja wymiaru kanału dławiącego została zapisana jako osobny plik bazowy .SCDOC dla uzyskania zakresu geometrii siatek symulacyjnych zgodnych z założeniem zakresu testowego w następnym kroku.

Modele parametryczne .SCDOC w następnym kroku zostały poddane procesowi generacji siatki symulacyjnej z pomocą aplikacji Ansys Fluent – modułu Meshing, w logice siatkowania geometrii wodoszczelnej (*watertight geometry*).

Dla uproszczenia procesu siatkowania, z uwagi na krytyczny wpływ zachowania siatki żywicy, zdefiniowany został lokalny zakres wymiaru siatki powierzchniowej dla części bryły reprezentującej domenę obliczeniową żywicy (*resin*), przedstawiony na rys. 78.

Name	resin_sizing
Growth Rate	1.5
Size Control Type	Body Size
Target Mesh Size [mm]	4
Select By	zone

Rys. 78 Parametr lokalnego wymiaru siatki Ansys Fluent, moduł Meshing

Parametry bazowej siatki powierzchniowej dobrane zostały metodą prób i błędów dla jednoczesnego zapewnienia dostatecznego zagęszczenia dla obszarów szczelin o krytycznej charakterystyce wpływu na zachowania ciśnieniowe przepływu, dla uzyskania gęstości siatki zgodnej z założeniami badania MIP oraz minimalizacji potrzebnego czasu obliczeniowego dla rozwiązania numerycznego modelu.

Następnie opisano geometrię jako wyłączone odwzorowanie domeny przepływu bez ciał stałych, opisano wspólną topologię brył dzielonych jako granice typu wewnętrznego (*internal*).

Uzyskane regiony domeny zostały całkowicie zdefiniowane jako domeny przepływu płynu.

W ostatnim kroku przygotowania siatki objętościowej, bez definiowania dodatkowego spłaszczania warstw przyściennych (*boundary region*) z uwagi na zaobserwowaną utratę stabilności jakości siatki w wyniku stosowania takiego rozwiązania w badanej geometrii, zdefiniowane zostały lokalne dla regionów parametry wymiarowe siatki objętościowej typu *polyhedra*.

Parametry użyte do przygotowania siatek modeli przedstawione zostały na rys. 79.

Generate the Surface Mesh

Minimum Size [mm] 0.2

Maximum Size [mm] 4

Growth Rate 1.5

Size Functions Curvature & Proximity

Ignore Proximity Across Objects? No

Curvature Normal Angle [deg] 18

Cells Per Gap 1

Scope Proximity To edges

Draw Size Boxes

Separate Out Boundary Zones by Angle? No

Update Regions

Region Name	Region Type
downstream	fluid
resin	fluid
upstream	fluid

Generate the Volume Mesh

Fill With polyhedra

Sizing Method Region-based

Region Name	Max Cell Length [mm]	Growth Rate
downstream	3.56	1.5
resin	1.05	1.5
upstream	2.94	1.5

Rys. 79 Parametry użyte do przygotowania siatki modelu Ansys Fluent, moduł Meshing

W oparciu o tak zdefiniowane parametry siatki przeprowadzona została ocena jakości siatki wg kryteriów znanych ze stanu techniki[99] – wartości kryteriów przyjęto jako *orthogonal-cell-quality* przekraczające wartość 0,4. Osiągnięto najniższą wartość parametru jako przekraczającą 0,42. Liczba komórek dla obszaru analizy przepływu w filtrze została potwierdzona jako odpowiadająca zakresowi wykreślonego w analizie MIS.

Dla przeprowadzonej oceny jakości siatki podjęta została seria siatkowania dla zakresu geometrycznego przygotowanych modeli w plikach .SCDOC. Modele zostały zapisane w przydzielonych lokalizacjach struktury folderów badania symulacyjnego – przygotowano siatki symulacyjne w zakresie testowym 1,2–1,6 mm w łącznej liczbie pięciu siatek.

W następnym kroku, z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Fluent, modułu Solution, podjęto symulację zachowania fizycznego przepływu płynu przez domenę obliczeniową, odpowiadającego wg badania korelacyjnego parametrów warunkom pracy rzeczywistej. Badanie zostało przeprowadzone w warunkach analizy pojedynczej fazy przepływu, z modelem lepkościowym dla rozproszenia energii turbulentnej jako SST k-omega – wg wcześniejszej analizy korelacji zachowania ciśnień bocznych punktów referencyjnych oraz zgodnie ze stanem wiedzy [76], [99], [101], [102] dla możliwie dobrego odwzorowania wpływu zachowania lepkościowych strat energii przepływu przy planowanej dyskretnej zmianie warunków brzegowych.

Jako medium przepływu w domenie obliczeniowej zdefiniowany został dostępny w bibliotece materiałowej Ansys Fluent materiał odpowiadający wodzie w stanie cieczi (*water-liquid*), bez zmiany parametrów domyślnych materiału, co przedstawiono na rys. 80.

Name	Material Type
water-liquid	fluid
Chemical Formula	Fluent Fluid Materials
h2o<l>	water-liquid (h2o<l>)
	Mixture
	none

Properties	
Density [kg/m ³]	constant Edit...
	998.2
Viscosity [kg/(m s)]	constant Edit...
	0.001003

Rys. 80 Parametr medium wody w Ansys Fluent, moduł Solution

Dobór warunków przepływu domeny obliczeniowej (*cell zone conditions/fluid*), zgodnie z parametrami przyjętymi w ramach analizy korelacyjnej z zachowaniem modelu empirycznego, został dobrany jako domyślny dla stref kolektorów wlotowego i wylotowego (*downstream/upstream*) oraz zgodny z modelem prędkościowo-lepkościowym (*relative velocity resistance formulation*) dobranym w ramach badania spadków hydraulicznych w modelu referencyjnym dla strefy filtra jonitowego (*resin*).

Parametry formulacji dla strefy filtra jonitowego przedstawione zostały w rozdziale 4.9.1 na rys. 70.

Zgodnie z przyjętym zakresem symulacji przyjęto warunki brzegowe dla każdego z trzech króćców wlotowych (*boundary conditions/inlet*) jako strumień masy (*mass flow rate*) odpowiadający przeliczonym wartościom strumienia dla czterech punktów symulacyjnych. Dla przepływu na poziomie 1,1 l/min przyjęto wartość przepływu 0,0061111 kg/s dla każdego z trzech króćców wlotowych. Dla przepływu 1,6 l/min analogicznie przyjęto wartość 0,00888889 kg/s, dla przepływu 2,1 l/min wartość 0,01166667 kg/s, a dla przepływu 2,6 l/min wartość 0,0144444 kg/s. Przykład zdefiniowanego parametru został pokazany na rys. 81.

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Reference Frame: Absolute

Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate

Mass Flow Rate [kg/s]: 0.006111111

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 0

Direction Specification Method: Normal to Boundary

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%]: 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Rys. 81 Parametr warunku brzegowego zadanego przepływu w Ansys Fluent, moduł Solution

Parametry turbulencji wlotu zostały przyjęte jako zdefiniowane przez stosunek intensywności i lepkości (*intensity and viscosity ratio*) na poziomie domyślnym wartości intensywności (*turbulent intensity*) 5% oraz stosunku lepkości – turbulencji (*turbulent viscosity ratio*) na poziomie 10 [-], zgodnie z potwierdzeniem w poprzednim badaniu korelacji wyników symulacji przeprowadzonych dla takich warunków brzegowych z pomiarami empirycznymi zachowania rozkładów ciśnienia w zbiorniku zbadanym laboratoryjnie.

Parametry wszystkich króćców wylotowych kolektora wylotowego zgodnie ze wskazaniem badania strojącego zostały zdefiniowane jako otwarte wyloty ciśnieniowe, o ciśnieniu absolutnym dławienia na poziomie 0 Pa, o domyślnych parametrach turbulencji. Parametry ścian domeny obliczeniowej zostały zdefiniowane jako domyślne, z brakiem poślizgu płynu na ścianie (*shear condition – no slip*).

Parametry kontroli solvera zostały określone jako domyślne, z globalnym krokiem czasowym dla symulacji stanu ustalonego (*pseudo time method/global time step*), przy sprzęganiu ciśnienia i prędkości metodą Rhie–Chow w oparciu o bezwładność płynu.

Kontrola konwergencji symulacji została przyjęta jako domyślnie ustawiona konwergencja koniunkcji warunków równań ciągłości, prędkości liniowych w osiach X, Y oraz Z, współczynnika k oraz współczynnika omega, przy kryterium absolutnym konwergencji dla każdego z czynników na poziomie <0,001, co przedstawiono na rys. 82.

Equations

Residual	Monitor	Check Convergence	Absolute Criteria
continuity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.001
x-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.001
y-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.001
z-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.001
k	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.001
omega	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.001

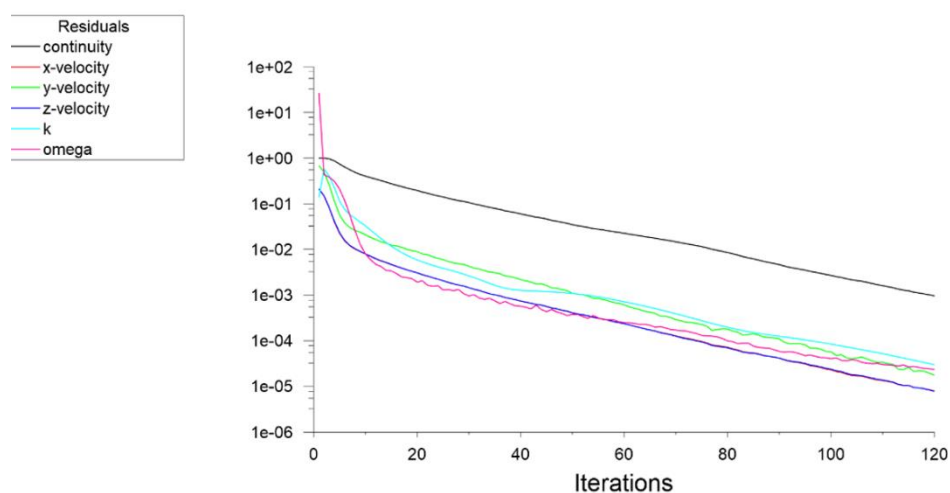
Rys. 82 Kryteria konwergencji obliczenia symulacyjnego, Ansys Fluent, moduł Solution

W ramach zdefiniowanego i zwalidowanego zakresu kryteriów przeprowadzono łączną liczbę 20 symulacji – w pięciu zakresach geometrii, dla czterech wariantów warunków brzegowych strumienia przepływu.

Wyniki symulacyjne każdorazowo osiągały konwergencję w zakresie iteracyjnym <200 iteracji. Liczba iteracji dla osiągnięcia koniunkcji warunków konwergencji została przedstawiona w tab. 4, przykładowy wykres zmiany wartości kryteriów konwergencji programu Ansys Fluent został przedstawiony na rys. 83.

Tab. 4 Tabela liczby iteracji potrzebnych do spełnienia zadanych warunków konwergencji symulacji geometrii docelowej

	1,1 [L/min]	1,6 [L/min]	2,1 [L/min]	2,6 [L/min]
1,2 [mm]	100	111	125	137
1,3 [mm]	100	108	117	127
1,4 [mm]	112	121	134	152
1,5 [mm]	108	118	129	138
1,6 [mm]	107	113	123	136



Rys. 83 Przykładowy wykres zmiany obliczonych parametrów konwergencji w funkcji postępu iteracji symulacji, Ansys Fluent, moduł Solution

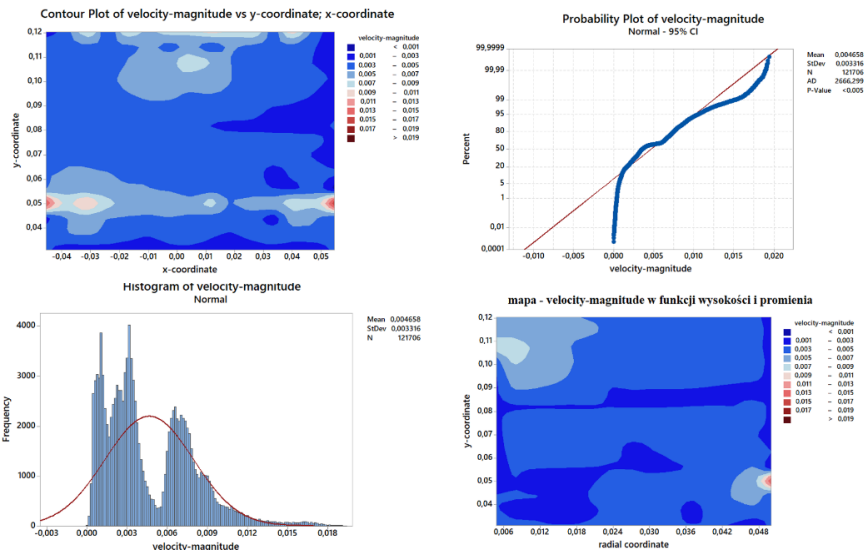
Dla otrzymanych wyników podjęto zakres metod pozyskania danych surowych dla oceny rozkładu wartości prędkości (*velocity magnitude*) w objętości złoża (*resin*):

- eksport danych surowych dla objętości komórek całego modelu do pliku tekstowego ASCII – metoda generowała plik .TXT o rozmiarze około 800 MB dla każdej symulacji. Podjęto próby analizy danych dla pliku, jednak ograniczenia wewnętrznego buforu pamięci aplikacji MS Notatnik, MS Excel oraz Minitab 17 nie pozwoliły na przetworzenie danych opracowanych w takiej formie. W wyniku prób nie uzyskano metody obróbki danych pozwalającej na stabilny proces analizy w aplikacjach;

- eksport danych surowych filtrowanych dla objętości komórek obszaru filtra – aplikacja Ansys Fluent nie przewiduje możliwości eksportu danych objętościowych komórek dla stref domeny obliczeniowej w formacie ASCII;

- eksport danych filtrowanych powierzchniowych dla obszaru filtra (*resin*) – podjęto eksport oraz analizę rozkładu danych – wyniki analizy nie odpowiadały spodziewanemu rozkładowi normalnemu zachowania prędkości w objętości filtra. Przypuszczenie autora wskazuje, że na kształt rozkładu histogramu danych powierzchniowych komórek wpływają efekty przyścienne lepkości (pierwsze lokalne maksimum krzywej gęstości prawdopodobieństwa w okolicy zera) oraz wartości strumieni wlotowych szczelin (drugie lokalne maksimum krzywej gęstości prawdopodobieństwa).

Przykład danych rozkładu dla danych powierzchniowych eksportu na przykładzie geometrii 1,2 mm w warunkach przepływu 1,1 l/min przedstawiono na rys. 84.



Rys. 84 Dane rozkładów statystycznych eksportu parametrów obliczonych komórek powierzchniowych domeny obliczeniowej żywicy (resin), program Minitab 17

Ostatecznie podjęto eksport danych objętościowych z wykorzystaniem metody statystycznej opartej na przeliczeniu przybliżenia statystycznego dla danych eksportowanych w formie parametrów klastrowych histogramów rozkładów prędkości (*velocity magnitude*) w objętości złoża (*resin*).

Dla standaryzacji formatu danych dla przybliżeń porównawczych przyjęto liczbę klastrow na stałym poziomie $N = 100$ oraz zakres prędkości od 0 m/s do 0,05 m/s.

Przyjęto przeliczenie dla parametrów średniej, odchylenia standardowego oraz wariancji parametrów klastrow wg następujących wzorów uśredniających:

średnia prędkość:

$$\bar{v} \cong \frac{\sum v_i n_i}{N} \quad (14)$$

gdzie

v_i – wartość centralna i – tego klastra

n_i – liczność i – tego klastra

N – całkowita liczność populacji

Odchylenie standardowe prędkości:

$$\sigma \cong s \cong \sqrt{\frac{\sum n_i (v_i - \bar{v})^2}{N - 1}} \quad (15)$$

gdzie

v_i – wartość centralna i – tego klastra

\bar{v} – wartość średnia populacji

n_i – liczność i – tego klastra

N – całkowita liczność populacji

Wariancja prędkości:

$$\sigma^2 \cong s^2 \cong \frac{\sum n_i (v_i - \bar{v})^2}{N - 1} \quad (16)$$

gdzie

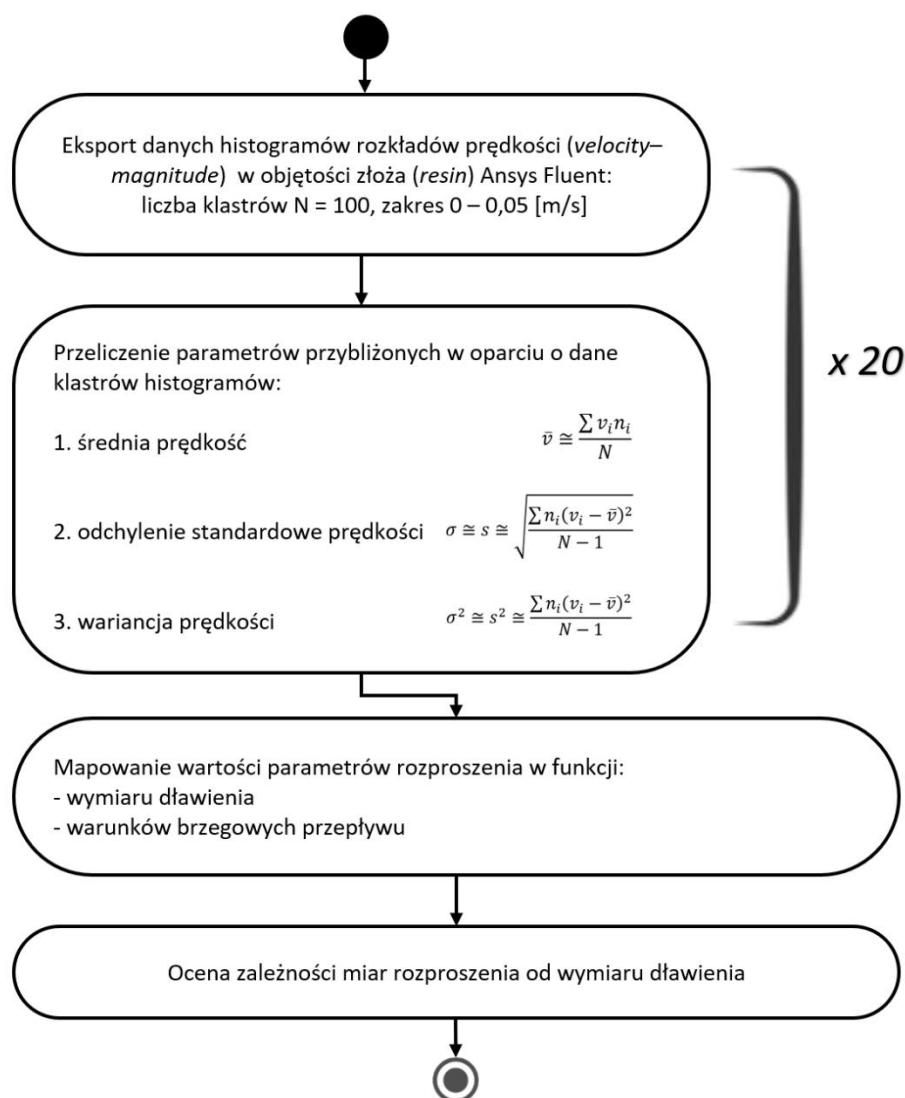
v_i – wartość centralna i – tego klastra

\bar{v} – wartość średnia populacji

n_i – liczność i – tego klastra

N – całkowita liczność populacji

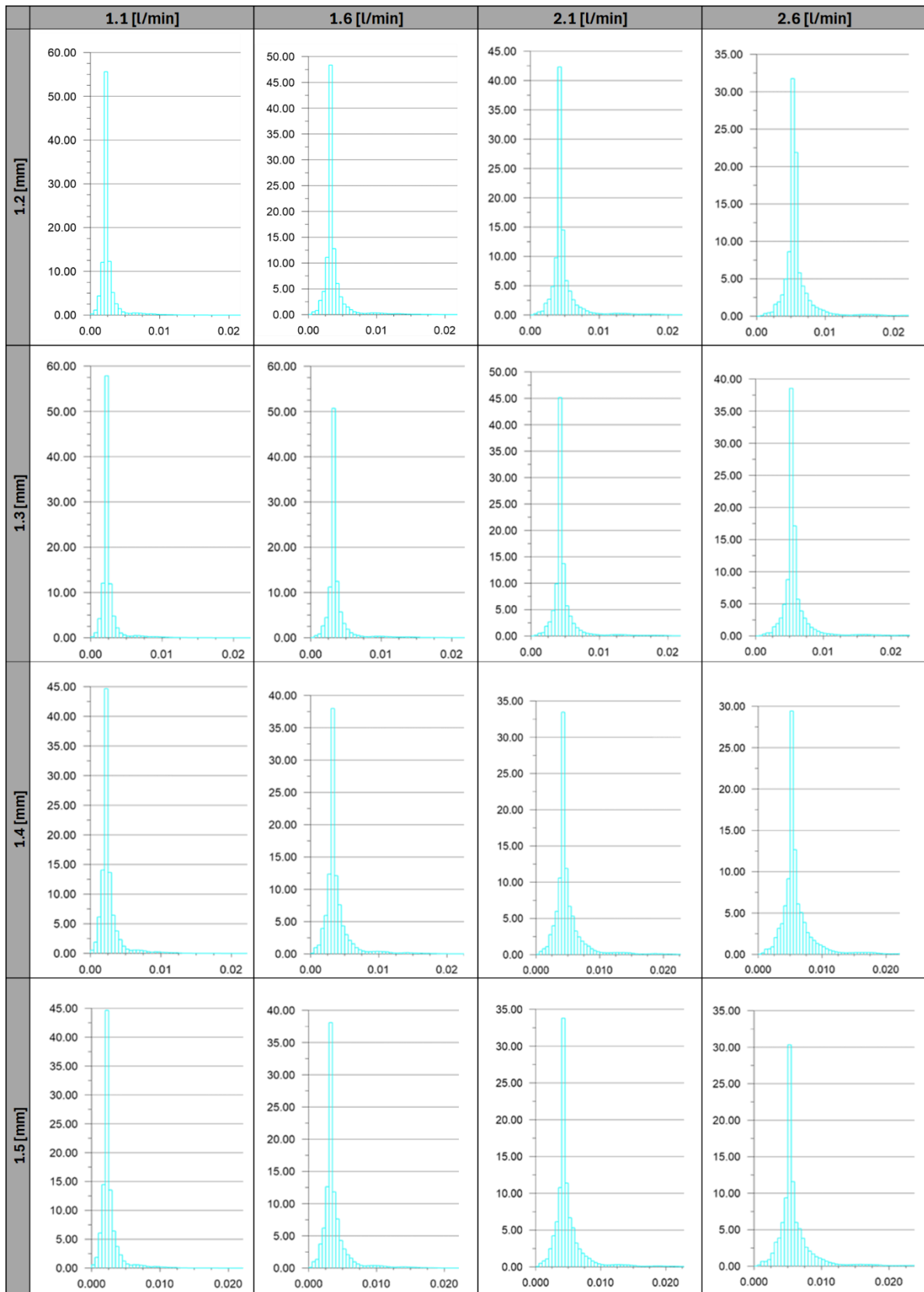
Schemat postępowania dla pozyskania analizy statystycznej rozkładu wyników został przedstawiony na rys. 85.



Rys. 85 Schemat postępowania – analiza statystyczna wyników symulacyjnych w opisanym badaniu symulacyjnym – analiza rozkładu statystycznego wyników

W ramach eksportu danych otrzymano pulę histogramów rozkładu prędkości w objętości złoza (resin) przedstawioną w tab. 5.

Tab. 5 Tabela histogramów wyników prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów $N = 20$



4.10 Ocena wyników symulacyjnych i analiza statystyczna wyników symulacji optymalizacyjnej CFD strojonego modelu

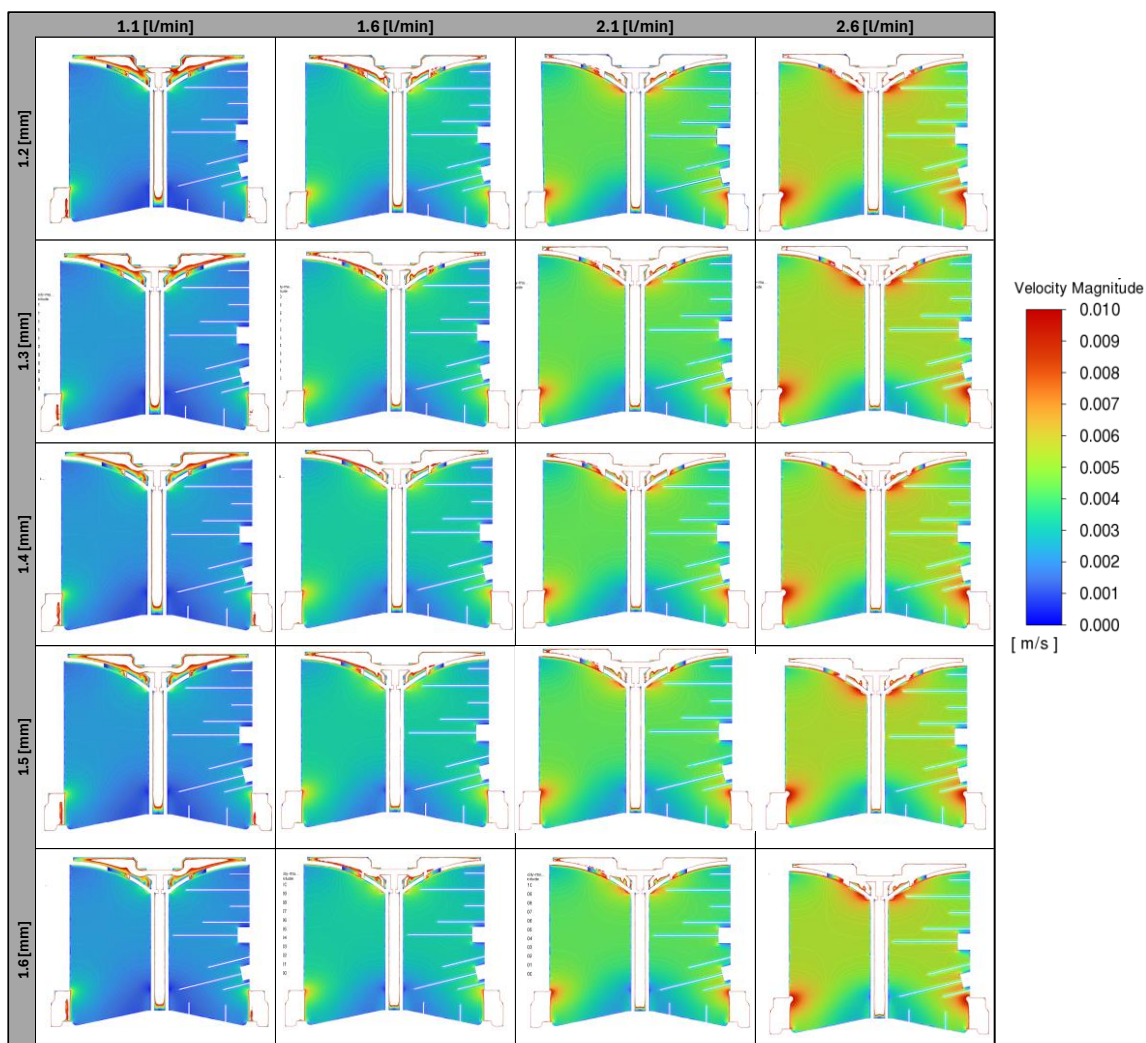
W ramach otrzymanych wyników symulacyjnych w pierwszej kolejności podjęto ocenę porównawczą zachowania przepływów w przekroju centralnym puli próbek.

Porównano zachowania przekrojów prędkości pod kątem oceny zmiany jednorodności pola prędkości w geometrycznej bliskości sita prowadzącego do otworu regulacji ciśnienia.

Ocena map zmiany rozkładów prędkości w dobranym zakresie wskazała na zauważany trend przybliżenia prędkości obszaru okolicy podstawy cylindra centralnego do zakresu prędkości dominującego w objętości dla wszystkich zakresów przepływu wraz ze wzrostem wymiaru otworu dławiącego, potwierdzając zasadność metody sterowania normalizacją prędkości przepływu przez zmianę wymiaru geometrycznego otworu dławiącego.

Wyniki map prędkości wewnątrz złoża dla pola symulacji o jednorodnie przyjętej legendzie kolorystycznej zostały przedstawione w tab. 6:

Tab. 6 Tabela map kolorystycznych rozkładu prędkości (velocity magnitude) w przekroju centralnym dla symulowanego zakresu wariantów $N = 20$

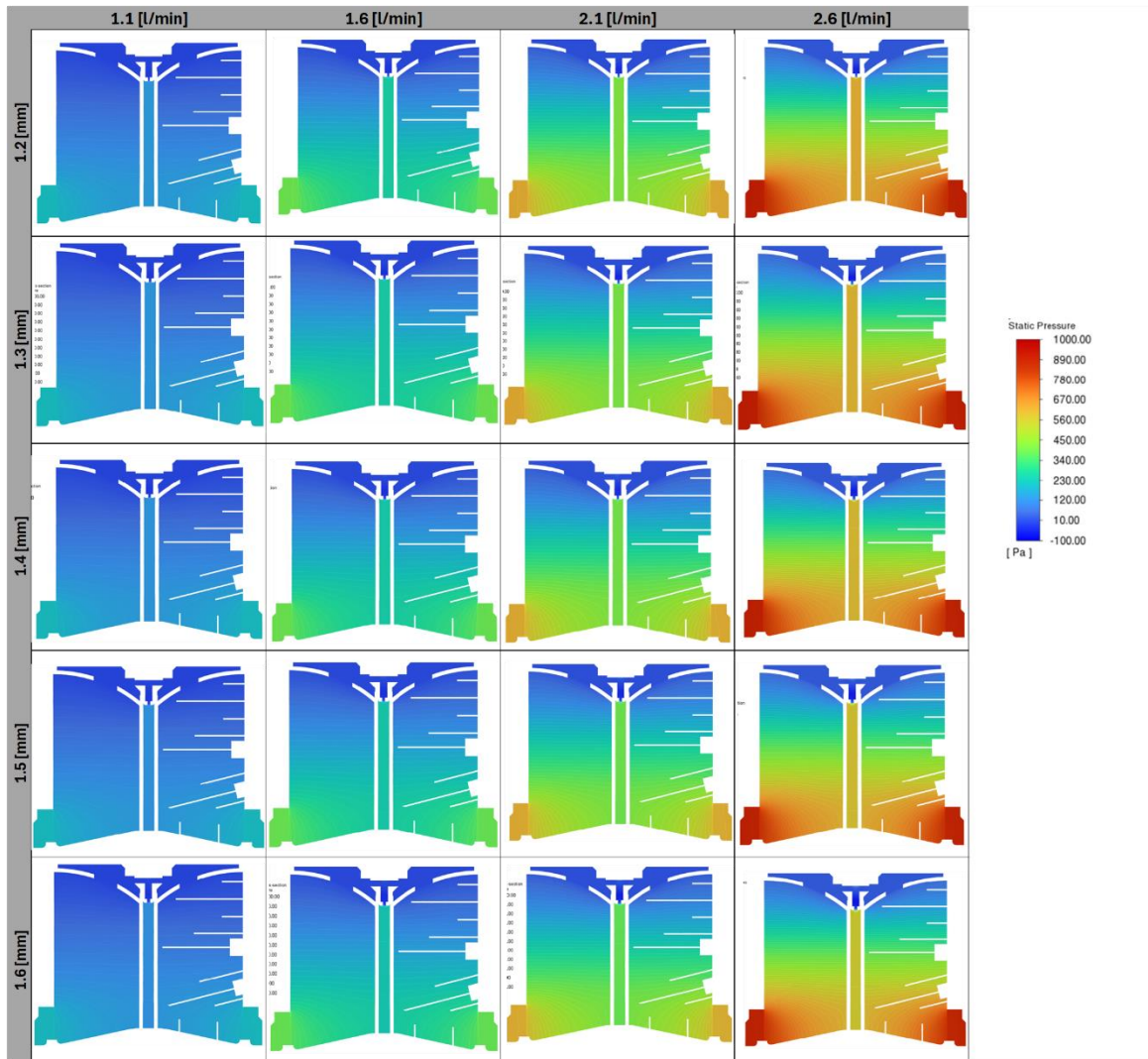


W następnej kolejności oceniono rozkład ciśnienia wewnątrz systemu.

Ocena zmiany rozkładu ciśnienia w oparciu o mapy ciśnień wykazała niemal niezauważalną zmianę rozkładów ciśnienia wewnątrz zbiornika w badanym polu geometrii i przepływów, potwierdzając w dalszym ciągu zaistnienie zmiany w systemie w funkcji zmiany wymiaru dławienia, zgodnie z obserwacjami laboratoryjnymi.

Wyniki map ciśnienia wewnątrz systemu dla pola symulacji zostały przedstawione w tab. 7.

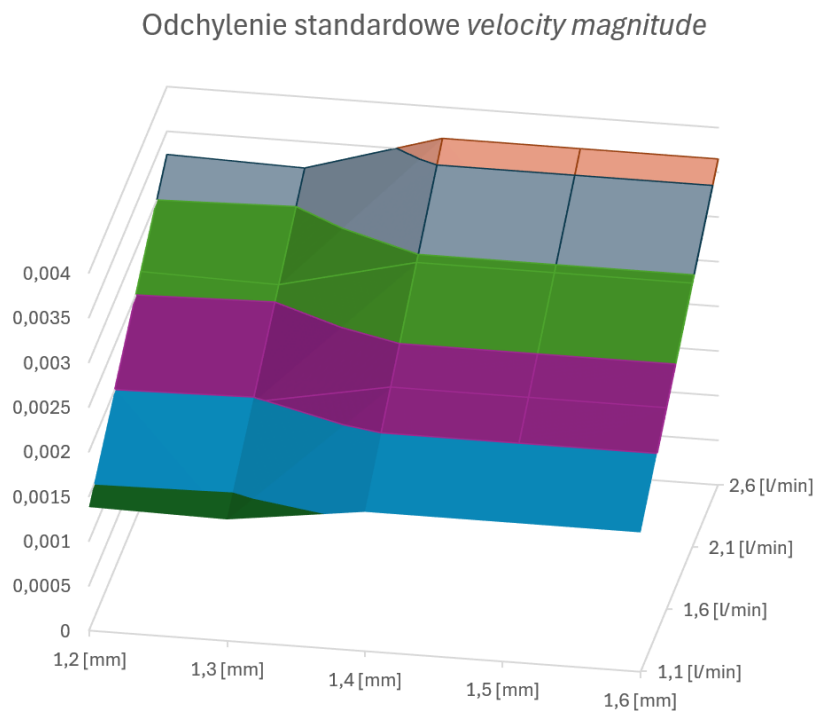
Tab. 7 Tabela map kolorystycznych rozkładu ciśnienia (static pressure) w przekroju centralnym dla symulowanego zakresu wariantów $N = 20$



Dane pochodzące z histogramów rozkładów parametru prędkości (*velocity magnitude*) w modelu zostały zestawione przy pomocy opisanej metody statystycznej estymacji parametrów rozproszenia.

Ocena parametrów rozproszenia wartości prędkości (*velocity magnitude*) w komórkach modelu została wykonana w funkcji zmiany warunków brzegowych jako mapa powierzchniowa wartości w funkcji geometrii i warunków brzegowych przepływu.

Ocena odchylenia standardowego wykazała lokalne minimum dla wszystkich wartości przepływu przy wymiarze średnicy dławiącej na poziomie 1,3 mm, co przedstawione zostało na rys. 86.

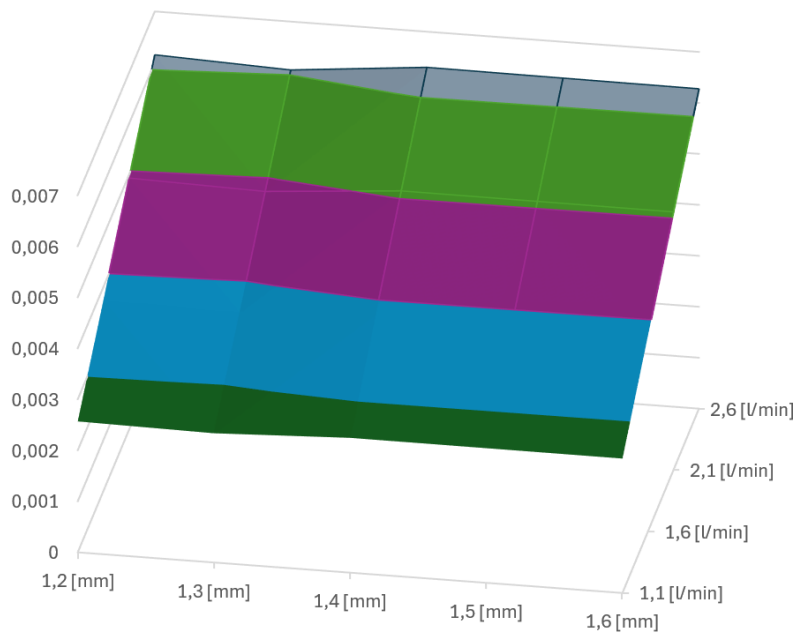


Rys. 86 Wykres 3d estymowanego odchylenia standardowego prędkości (*velocity magnitude*) dla symulowanego zakresu wariantów $N = 20$ w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s]

Ocena średniej estymowanej wartości prędkości w przepływie, liczonej jako suma ważona wartości elementarnych prędkości środka klastra histogramu (ważona po licznosciach klastrów), nominalnie oczekiwana jako wartość porównywalna dla wartości wyliczonej w sposób nieestymowany przy zachowaniu niezmienniej objętości bryły i analogicznego wydatku objętości, wykazała niewielki spadek wartości dla wartości modelu 1,3 mm. Zróżnicowanie parametru zostało uwzględnione przy dalszej analizie dla skorygowania zróżnicowania pomiędzy parametrami mogącego wynikać z niższej o ok. 5% wartości N populacji $R = 1,3$ mm.

Wykres zachowania estymowanej średniej prędkości w funkcji zmiennych parametrów symulacji został przedstawiony na rys. 87.

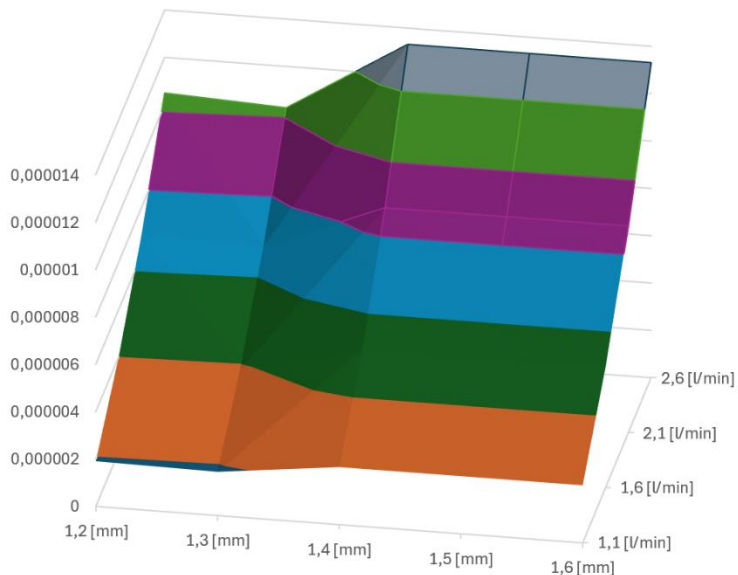
Średnia estymowana velocity magnitude



Rys. 87 Wykres 3d estymowanej średniej prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów $N = 20$ w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s]

Ocena wariancji estymowanej dla modelu wykazała lokalne minimum dla wymiaru dławienia 1,3 mm dla wszystkich scenariuszy warunków przepływu, co przedstawione zostało na rys.88.

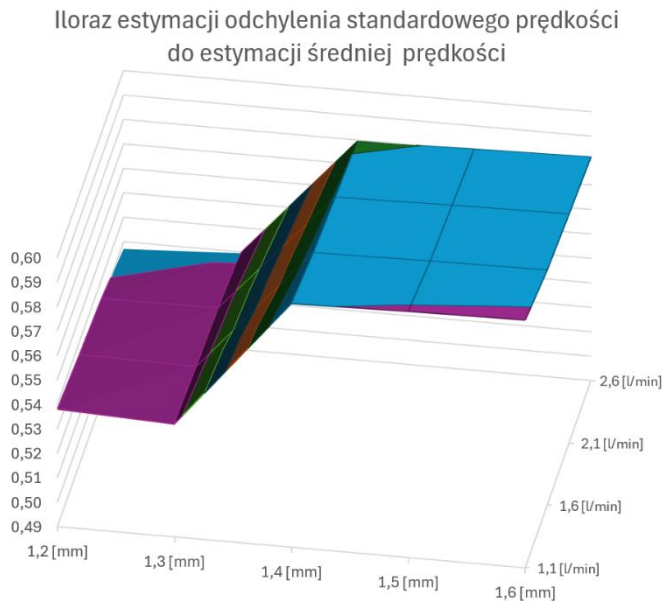
Wariancja estymowana velocity magnitude



Rys. 88 Wykres 3d estymowanej wariancji prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów $N = 20$ w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s]

Następnie zestawiono wartości rozproszenia z wartościami średnimi dla poszczególnych prób.

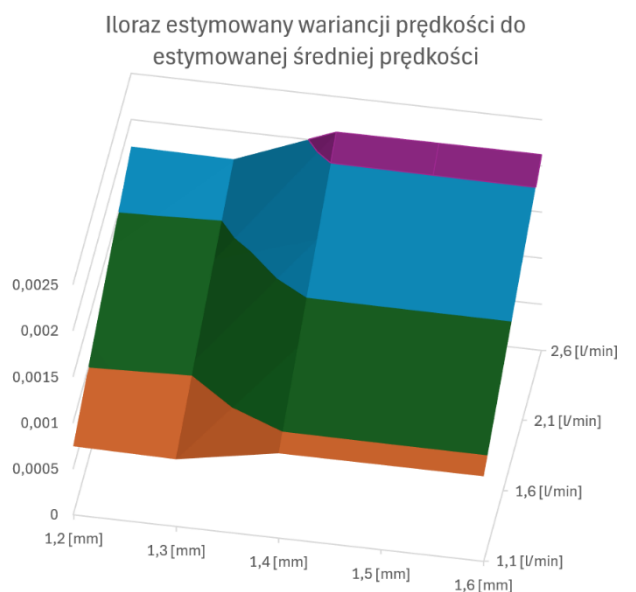
Iloraz odchylenia standardowego do wartości średniej prędkości w poszczególnych punktach został przedstawiony poniżej, wykazując najniższą wartość dla wariantu geometrycznego dławienia 1,3 mm. Największe zaobserwowane różnice rozproszenia w ujęciu procentowym dla wymiaru dławienia 1,3 mm wyniosły: 5,52% dla 1,1 l/min, 5,22% dla 1,6 l/min, 5,11% dla 2,1 l/min oraz 5,2% dla 2,6 l/min, co przedstawione zostało na rys. 89.



Rys. 89 Wykres 3d ilorazu estymowanego odchylenia standardowego prędkości (velocity magnitude) do estymowanej średniej prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów $N = 20$ w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s]

Ocenie poddany został również iloraz wariancji, potwierdzając wcześniejsze obserwacje dla lokalnego minimum rozproszenia prędkości w wariancie geometrycznym dławienia 1,3 mm.

Mapa ilorazu estymowanej wariancji prędkości do estymowanej średniej prędkości została przedstawiona na rys. 90.



Rys. 90 Wykres 3d ilorazu estymowanej wariacji prędkości (velocity magnitude) do estymowanej średniej prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów $N = 20$ w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławnienia, [m/s]

W następnym kroku dokonano porównania parametrów uśrednionych dla poszczególnych wymiarów dławnienia. Uśrednienia dokonano w oparciu o metodę opisaną w poprzednim paragrafie, przyjmując za daną wsadową sumy licznosci analogicznych klastrów histogramów.

Wartości przeliczenia pokazano w tab. 8.

Tab. 8 Tabela wartości uśrednionych parametrów statystycznego rozproszenia dla geometrii obszaru dławnienia w zakresie 1,2–1,6 mm

	1,2 mm	1,3 mm	1,4 mm	1,5 mm	1,6 mm
AVG VEL	0,004347	0,004286	0,004469	0,004462	0,004455
STD_EST_VEL	0,002757	0,002719	0,003041	0,003040	0,003038
VAR_EST_VEL	0,000008	0,000007	0,000009	0,000009	0,000009
std:avg	0,634213	0,634311	0,680460	0,681227	0,681844
var:avg	0,001749	0,001725	0,002069	0,002071	0,002071

5 Dyskusja

Zakres badań opisany w rozprawie miał na celu opracowanie możliwie dokładnej metodyki projektowania geometrii pasywnej regulacji ciśnień przepływu w rozwiązaniu patentowym przeznaczonym do użytkowania w zmywarkach domowych. W ramach oceny metodyki badano następujące zagadnienia:

1. zasadność założeń konstrukcyjnych koncyptowanego rozwiązania;
2. cechy chemiczne wykorzystywanych w rozwiązaniu żywic jonowymiennych:
 - a. porównanie zachowania pojemności jonowej preparatów dostępnych na rynku komercyjnym,
 - b. ocena wpływu parametrów hydraulicznych pracy jonitu na zmianę jego pojemności,
 - c. ocena przydatności korelacji parametrów hydraulicznych przepływu z wartościami chemicznej pojemności surowca dla warunków pracy;
3. cechy hydrauliczne zjawiska przepływu w rozważanym rozwiązaniu konstrukcyjnym:
 - a. ocena zachowania empirycznego rozkładu ciśnień w polu zmiennej geometrii rozwiązania konstrukcyjnego,
 - b. dobór metodyki kalibracji rozwiązania symulacyjnego dla odwzorowania zachowania rzeczywistego,
 - c. porównanie zachowania punktów referencyjnych rozwiązania empirycznego z rozwiązaniem symulowanym;
4. Porównanie zachowania punktów referencyjnych rozwiązania empirycznego z rozwiązaniem symulowanym
5. cechy statystyczne zjawisk hydraulicznych jako metoda pośredniego opisu stopnia chemicznego wykorzystania potencjału pojemności jonowej surowca- ocena zachowania symulacyjnego cech statystycznych rozkładów prędkości modelu symulacyjnego CFD rozwiązania badanego jako kryterium optymalizacji wymiaru konstrukcji dławienia.

W ramach dyskusji zostaną przedstawione spostrzeżenia płynące z analizy powyższych zagadnień, w kolejności odpowiadającej powyższemu ustrukturyzowanemu listowaniu. Badane zagadnienia zostaną również omówione w perspektywie stanu wiedzy.

Ocena zasadności założeń konstrukcyjnych koncyptowanego rozwiązania

Ocena zasadności przeprowadzona w środowisku symulacyjnym SolidWorks Flow Simulation dla warunków pracy odpowiadających wytycznym konstrukcyjnym środowiska przemysłowego – rozwiązanie koncyptowane zostało zaproponowane jako metoda dla poprawy stopnia wykorzystania surowca jonitu, a tym samym zmniejszenia udziału masowego surowca specjalistycznego w koszcie produkcyjnym rozwiązania dla poprawy konkurencyjności oferty przedsiębiorstwa. Ocena wstępna zasadności rozwiązania konstrukcyjnego została przeprowadzona zgodnie ze sztuką inżynierię, stanem wiedzy na dzień oceny oraz z użyciem oprogramowania symulacyjnego natywnego dla klienta, dla którego zaprojektowano proponowane rozwiązanie. Metodyka strojenia dla oceny wstępnej została przeprowadzona w oparciu o uproszczony model laboratoryjny zbiornika, dla którego pomiarów spadków ciśnienia w przepływie dobrano model opisu numerycznego ciała porowatego.

Ocena zdatności rozwiązania dla normalizacji przepływu wewnątrz złoża oparta została na zmianie położenia i kształtu izopowierzchni prędkości przepływu wewnątrz złoża dla porównywanych rozwiązań – pierwszego, odpowiadającego konwencjonalnemu układowi sita radialnego i kolektora czołowego regulujących przepływ w zbiorniku oraz drugiego, wprowadzającego kształt kolektora jako wycinek

wykreślonego pozycją źródła radialnego torusa, wspieranego przez drugą część kolektora w postaci rurki zadającej lokalne pole obniżonego ciśnienia w centrum obszaru o istotnie „omijanej” przez strumienie przepływu w filtrze. Ocena przydatności koncepcji konstrukcyjnej w postaci modelu symulacyjnego oprogramowania SolidWorks Flow Simulation z uwagi na brak możliwości oceny parametrycznej cech rozkładu wewnątrz symulowanych oprogramowaniem objętości została wykorzystana wyłącznie jako *proof-of-concept* dla wewnętrznego uzasadnienia inwestycji przedsiębiorstwa w rozszerzenie prawa własności intelektualnej opartego na opisanym w niniejszej pracy zgłoszeniu WIPO na szerokie pole patentów nacjonalizowanych.

Wykorzystanie środowiska parametrycznego SolidWorks Flow Simulation jako natywnego dla całości projektowania CAD systemu zmywarki byłoby korzystne z perspektywy braku konieczności prowadzenia migracji modelu oraz ujednoczenia iteracji optymalizacyjnych lub możliwego wykorzystania symulowania parametrycznego krokowego w funkcji celu, jednak brak możliwości opisu mierzalnych cech jednorodności przepływu skutkowało koniecznością migracji do innego środowiska symulacyjnego dla docelowego badania optymalizacyjnego w funkcji miar rozproszenia.

Cechy chemiczne żywic jonowymiennych

Zakres badań zawarty w planie badawczym opisanym w niniejszej rozprawie w pierwszej kolejności podyktowany był przemysłowym wdrożeniem badania nad minimalizacją kosztów produkcyjnych rozpatrywanego wyrobu. Zgodnie z opisanym stanem wiedzy oraz techniki w przypadku urządzeń zmiękczających głównym składnikiem kosztu jednostkowego wytworzenia produktu jest udział masowy specjalistycznego surowca chemicznego w postaci żywicy wymiany jonowej wymiennej; nie jest to jednak pole techniczne o istotnym wskaźniku eksploatacji w krajobrazie patentowym – analiza patentowego stanu techniki wykazuje licznosc rozwiązań dotyczących logiki sterowania procesem regeneracji lub hydrauliki sterującej procesem regeneracji, z niewielkim udziałem rozwiązań konstrukcyjnych skupionych na optymalizacji hydraulicznej filtracji.

Osiągnięcie minimalizacji kosztu takiego surowca w metodyce badawczej OFAT (*one-factor-at-time*) możliwe jest w dwojaki sposób – przez eksplorację badawczą pola zależności kosztu jednostkowego sparametryzowanej pojemności chemicznej w stałych warunkach pracy lub przez optymalizację warunków pracy złoża dla maksymalizacji wykorzystania stałej pojemności chemicznej. Alternatywną metodą dla przeszukania pola rozwiązań byłaby coraz częściej stosowana metodyka DOE (*design of experiment*), gdzie przez zaprojektowanie metodyki eksperymentalnej wyznaczające odpowiednio rozproszone punkty pomiarowe w przestrzeni wszystkich zmiennych można byłoby wnioskować o wzajemnych współzależnościach czynników i próbować wskazać wieloczynnikowe optimum w oparciu o parametryzację funkcji czynników. Zastosowanie metodyki DOE w opisanym przypadku badawczym dla analizy szczegółowej współzależności czynników przy pozyskanym stanie wiedzy nie zostało wykorzystane z uwagi na niedostateczną liczbę informacji dla analitycznego skorelowania czynników przy projektowaniu eksperymentu wieloczynnikowego (*multi-factorial*) wg DOE oraz istotną liczbę szumów wynikających z dostępnej aparatury pomiarowej (brak kontroli i rejestracji pulsacji ciśnienia zasilającego, różnice optymalnego czasu regeneracji pomiędzy testowanymi surowcami), a tym samym: znaczną liczbę próbek pomiarowych dla pozyskania istotnych statystycznie wyników dla pełnego obrazu współzależności.

W ramach przeprowadzonej dla rezultatów badania analizy statystycznej wyników przeprowadzono analizę statystyczną zmienności zachowania zmierzonej metodą EDTA pojemności chemicznej jonowej poszczególnych preparatów w funkcji ściśle kontrolowanej stałej wartości parametru hydraulicznego przepływu, a tym samym prędkości liniowej. Wyniki niepublikowanej uprzednio analizy stanowiły wskazanie potwierdzające zasadność zastosowania modeli kinetycznych wymiany jonowej jako podstawy

dla uznania korelacji rozproszenia elementarnych prędkości liniowych w objętości jonitu ze stopniem wykorzystania pojemności jonowej zastosowanego w konstrukcji surowca.

Alternatywnym rozwiązaniem dla potwierdzenia korelacji byłoby przeprowadzenie dodatkowego badania jednoczynnikowego pomiaru zmiany pojemności w funkcji objętości wykonania prototypowego urządzenia o lokalnie zmienionych parametrach przepływu względem pierwotnego pojemnika cylindrycznego o w pełni jednorodnym rozkładzie prędkości – takie badanie skutkowałoby jednak dużą trudnością doboru metody lokalnej zmiany parametrów hydraulicznych w złożu o niezwiązanym uziarnieniu. Zastosowanie wiążących środków chemicznych dla spenetrowania wyznaczonych fragmentów celem obniżenia ich porowatości, a tym samym lokalnej prędkości przepływu względem obszarów o wyższej porowatości zmniejszyłoby powierzchnię aktywną wymiany objętości modyfikowanej, generując dodatkowy niekontrolowany czynnik wpływający potencjalnie na wynik pomiaru; ponadto istotnym nieznanym czynnikiem byłaby interakcja zastosowanego środka chemicznego z aktywnymi jonowo łańcuchami diwinylobenzenowymi jonitu, mogąc prowadzić do zmiany nominalnych parametrów chemicznych surowca.

Dodatkową alternatywą byłoby zastosowanie modelowania geometrycznego wymuszenia rozkładów przepływu, co ostatecznie sprowadzałoby się do wcześniejszego badania symulacyjnego wg metodyki późniejszych etapów, dla potwierdzenia zasadności metodyki badania późniejszych etapów, co prowadziłoby do walidacji *idem-per-idem*.

Badanie statystyczne rozkładu efektywności dużej próbki cykli pracy przy zapewnionej jednorodności warunków brzegowych badania, podparte analizą dynamiki chemicznej procesu wymiany jonowej na powierzchni, posłużyło ostatecznie jako wskazanie zasadności wykorzystania cech rozproszenia prędkości jako wyznacznika policzalnego dla optymalizacji geometrii. Istotne jest, aby zaznaczyć, że nie zbadano szczegółowego charakteru korelacji pomiędzy poszczególnymi wskaźnikami rozproszenia statystycznego prędkości medium w objętości filtra a zmierzoną pojemnością jonową, co nie było możliwe z uwagi na jednorodny charakter danych analizowanych dla rozproszenia pojemności. Z tego powodu w badaniu statystycznym rozproszenia prędkości liniowych symulowanego przepływu przez złożę jonitowe jako kryterium optymalizacji rozpatrzono szereg różnych miar rozproszenia populacji prędkości.

Cechy hydrauliczne zjawiska przepływu w rozważanym rozwiązaniu konstrukcyjnym

Opierając rozwiązanie konstrukcyjne bazujące na zapewnieniu wewnątrz geometrii filtra, w miejscu o mniejszych wartościach lokalnych strumienia przepływu (obszaru niewykorzystanego) objętości o miarowo obniżonym ciśnieniu dla zmiany kierunków strumieni medium przepływającego przez filtr, autor rozwiązania i niniejszej rozprawy czerpał z szerokiego zakresu doświadczeń i wiedzy dla nauk górniczych, w szczególności inżynierii eksploatacji złóż surowców płynnych. Metoda stochastycznego opisu przepływu przez filtry oraz kształtowania gęstości strumieni objętościowych w objętościach przestrzeni porowatych przez zadanie zaprojektowanego gradientu ciśnienia jako energii napędzającej przepływ są powszechnie wykorzystywane przy planowaniu i optymalizacji eksploatacji złóż węglowodorów czy wód mineralnych.

Cechą odróżniającą koncepcję opisaną przez autora od rozwiązań sterowania ciśnieniami i prędkościami filtracji w eksploatacji złóż surowców płynnych, wykorzystującymi szereg elementów pozwalających na aktywną kontrolę przepływu każdej z wielu kolumn, oraz aktywne zatłaczanie gazów dla regulacji rozkładów ciśnienia poduszek gazowych magazynujących ciśnienie dla zapewnienia energii eksploatacji jest fakt, że dla opisywanego rozwiązania jedynym parametrem technicznym dostępnym jako cecha sterowania jest wymiar zwężki wymuszającej dławienie objętościowego przepływu na wylocie kanału regulacji ciśnienia objętości złoża. Z uwagi na fakt, że jedną z cech bardzo istotnych dla zastosowania w

produkcji sprzętu gospodarstwa domowego konkretnych konstrukcji zbiorników wymienników jonowych jest możliwe niski spadek ciśnienia przepływu w module, cecha narzucona przez regulację EN61770 w postaci obowiązku wykonania atmosferycznego otwarcia kanału przepływu wody wodociągowej przed obróbką chemiczną wody dla zapewnienia bezpieczeństwa nie jest możliwe zastosowanie jako dowolnego parametru konstrukcyjnego wymuszenie istotnego wzrostu ciśnienia wewnątrz zbiornika.

Badania zarówno empiryczne, jak i symulacyjne, w zgodzie ze stanem faktycznym i zakresem wymagań technicznych producentów sprzętu AGD, wykazały spadki ciśnienia w przepływie przez moduł jonitu z obudową na poziomie nieprzekraczającym 1000 Pa przy badanym zakresie przepływu. Podjęta ocena skuteczności zastosowania rozwiązania przeprowadzona w pierwszej fazie badań jako badania CFD w natywnym środowisku CAD wykorzystanej konstrukcji źródłowej wykazała zauważalną zmianę kształtów izobar ciśnienia w objętości domeny obliczeniowej. Zaobserwowano również zmianę kształtu izopowierzchni prędkości przepływu, potwierdzając zasadność koncepcji sterowania przez zaprojektowanie obszaru o sztucznie obniżonym ciśnieniu wewnątrz zbiornika filtracyjnego. W toku analizy pierwszych, wstępnych badań wpływu posadowienia konstrukcyjnego otworu upustu ciśnienia wewnątrz geometrii na rozkład prędkości wewnątrz filtra wykazano brak możliwości eksportu danych pozwalających na zastosowanie dobranego kryterium optymalizacji jako parametru policzalnego i mierzalnego w środowisku SolidWorks Flow Simulation. Przyczyną braku możliwości zastosowania dobranego kryterium był zaobserwowany brak możliwości eksportu danych dotyczących surowych wyników przeliczenia iteracyjnego siatki obliczeniowej oraz brak oprogramowanego narzędzia analiz statystycznych dla danych komórek siatki modelu. Ponadto możliwości sterowania parametrami siatki oraz modelami numerycznymi obliczenia lepkościowej dyssypacji energii przepływu w środowisku SolidWorks Flow Simulation nie pozwalały na zastosowanie metodyki symulacyjnej zgodnej z aktualnym stanem wiedzy, co skutkowało koniecznością migracji modelu do innego środowiska. Do badań nad zachowaniem hydraulicznym rozwiązania oraz wpływu parametrów geometrycznych na efektywność rozwiązania dla kryterium optymalizacyjnego wybrano pakiet oprogramowania Ansys, a dokładniej: aplikację Ansys SpaceClaim oraz Ansys Fluent w modułach Meshing oraz Solution, w wersji 2022R2. Pakiet został wybrany z uwagi na szerokie możliwości konfiguracji parametrów na każdym etapie przygotowania do obliczeń dla wykorzystania metodyki obliczeniowej możliwie zbliżonej lub tożsamej z aktualnym stanem literatury.

Z uwagi na przyjęty w badaniach standard weryfikacji poziomu odwzorowania zachowania rzeczywistego badanego rozwiązania w oprogramowaniu symulacyjnym konieczne było określenie metody, która pozwoli na przeprowadzenie strojenia prowadzącej do niezależności kontroli parametrów hydraulicznych przepływu dynamicznego, inaczej przepływu, którego znaczna część równań zachowania energii będzie zależna od zachowania pędu, od zachowania stochastycznego w przepływie w filtrze, zwanym potocznie w literaturze sektora nafty i gazu przepływem filtracyjnym. Metodyka strojenia zachowania stochastycznego przepływu w filtrze została opracowana w oparciu o przekształcenia przedstawione w podręczniku użytkownika oprogramowania Ansys Fluent.

Bazując na analizie inżynierskiej wrażliwości zachowania spadków ciśnień w przepływie przez cylinder wypełniony polidispersyjną sferyczną żywicą jonowymienną, ustalono, że model empiryczny dla badań laboratoryjnych pozyskania krzywej zmiany spadku ciśnienia w funkcji zmiany objętości przepływu w stałej geometrii powinien gwarantować możliwie jednorodny tensor ciśnienia oraz wektor prędkości na powierzchni granicznej cylindra uwięzionej żywicy. Ponadto określono, że cecha porowatości przegrody, dla minimalizacji wpływu na pomiar, powinna odznaczać się większą przekrojową ilością przestrzeni otwartej niż elementarny przekrój cylindra w osi przepływu.

Alternatywnie wykorzystanie modelu empirycznego niespełniającego ustalonych kryteriów skutkowałoby przekłamaniem parametru poszukiwanej krzywej spadku ciśnienia przez istotny wzrost wpływu nierównego rozkładu prędkości lub wpływu spadku hydraulicznego przewężenia światła przepływu w przegrodzie na całkowity zmierzony spadek hydrauliczny.

Przyjęte warunki dla otrzymania wiarygodnych wyników testu kalibracji empirycznej dla ciała porowatego wymagały wstępnej weryfikacji założeń zerowych przy pomocy domyślnych parametrów modelu przepływu w środowisku Ansys Fluent oraz podjęcia kroku iteracyjnego pozwalającego znormalizować rozkład ciśnień i prędkości do przyjętych przez autora badania warunków kryterium jednorodności. Krok iteracyjny projektowania pierwszego zbiornika kalibracyjnego dotyczył wprowadzenia podwójnej, symetrycznej względem żywicy przegrody, znanej też pod nazwą „deflektor”, rozbijającej skolimowany strumień w świetle wylotu otworu zasilającego kolektora wlotowego, spójcjonowanej w połowie wysokości stożkowego kolektora dla wymuszenia wirowego objętościowego wyrównania pędu strumienia. W następnym kroku dokonano adaptacji zweryfikowanego modelu CAD dla dostosowania brył do uproszczonego wytworzenia w technologiach przyrostowych. W ten sposób opracowany model został przebadany w środowisku laboratoryjnym, z kontrolą parametrów przepływu z użyciem magnetometrycznego kalibrowanego przepływomierza SM6120 o rozdzielczości +/- 0,02 l/min, w oparciu o ciśnienie sieciowe dławione zaworem kulowym oraz odejście boczne szczelne z podpiętym przekaźnikiem ciśnienia XMLGB05L73SBM o dokładności +/- 0,3%. Tak skonfigurowany zestaw pomiarowy pozwolił na otrzymanie serii wyników przyrostu ciśnienia przed zbiornikiem w funkcji zmiany wydatku przepływu, pozwalając w połączeniu ze zmierzoną geometrią na wykreślenie krzywej spadku ciśnienia w funkcji prędkości liniowej w przepływie w filtrze, a następnie z pomocą przekształceń matematycznych dla przyjętych modeli numerycznych spadku ciśnienia funkcji spadku ciśnienia od prędkości liniowej, która pozwoliła na kalibrację modelu CFD dla odwzorowania rzeczywistego zachowania w środowisku Ansys Fluent, potwierdzonego uzyskaniem porównywalnego spadku ciśnienia w środowisku symulacyjnym.

Porównanie zachowania punktów referencyjnych rozwiązania empirycznego z rozwiązaniem symulowanym

Z uwagi na istotny wpływ lepkości płynu, bezwładności płynu oraz dysypacji energii przepływu na całokształt zachowania przepływu w filtrze dla potwierdzenia dokładności wykonanej kalibracji modelu, mającego pełnić rolę dokładnego cyfrowego odwzorowania zbiornika rzeczywistego, konieczne było przyjęcie empirycznie zmierzonych parametrów dla jednoznacznie zdefiniowanych obszarów wewnętrznych złoża jako cech referencyjnych dla oceny odwzorowania zachowań rzeczywistych w wynikach symulacyjnych.

Dobór opisanej formy metodyki podyktowany był podpartym badaniem literaturowym, pokazującym podobną metodykę badania dla oceny zjawisk zachodzących w przepływie filtracyjnym w kontrolowanym środowisku filtra kulek szklanych[68], choć metodyka stanu techniki dla oceny zachowania w filtracji wykorzystuje niejednokrotnie inne metody, np. pomiary optyczne endoskopowe[103]. Ocena zachowania wewnątrz złoża oparta na matrycy rozmieszczonych w objętości badanej sond ciśnienia połączonych z cyfrowymi przekaźnikami ciśnienia pozwoliła na uzyskanie dużej puli danych dla porównania zachowania modelu symulacyjnego z jego empirycznym odwzorowaniem. Analiza rozkładów pozwoliła również na ocenę dokładności pomiaru w ujęciu dryfu stanów czujników dla poszczególnych punktów pomiarowych, przez ocenę gęstości prawdopodobieństwa dla uzyskanego rozkładu Weibulla dryfu czujników oraz otrzymane wartości oczekiwanego i maksymalnego błędu pomiarowego, do którego znanej wartości korelacja wyników symulacyjnych musiała wykazać zbieżność. Błąd czujnika oceniony został na poziomie 10%, co w ujęciu kosztu pojedynczego niewzorcowanego

czujnika na poziomie około 1€ było wynikiem spodziewanym i akceptowalnym. Wykorzystanie czujników wzorcowanych, wyższej klasy, z całą pewnością pozwoliłoby na dokładniejszą weryfikację odwzorowania modelu rzeczywistego w środowisku symulacyjnym poprzez przyjęcie ciśniejszego kryterium korelacji dla wyników zmierzonych i symulowanych, pozwalając docelowo na mniejszą niepewność otrzymanych wyników rozkładu. Kryterium korelacji w oparciu o przewidywany błąd czujników na poziomie do 10% skutkowało kryterium akceptacji współczynnika korelacji wyników rzeczywistych na poziomie 90% jako odwzorowującego zachowanie w populacji próbek o zmiennych warunkach brzegowych i geometrii.

Na korzyść dokładności metodyki strojenia działał fakt, że korelacja została wykonana dla szerokiego zakresu danych przepływu – dokładnie dla 118 punktów pomiarowych z puli pierwotnych 120. Każdy punkt pomiarowy był wartością uśrednionego stanu jednego z 10 czujników oraz cech statystycznych rozkładu populacji stanu tego czujnika dla niezmiennych geometrii i niezmiennego przepływu, w 60 s czasu przepływu. Dwa ze 120 empirycznych punktów pomiarowych zostały wyeliminowane z puli danych korelacyjnych jako odstające, z uwagi na istotnie odróżniające się od przewidywanych rozkładem parametrów odchylenia standardowego populacji danych czujnika w ujęciu braku kontrolowanego czynnika mogącego powodować podobną skalę zmian wartości. Wyniki zostały wyeliminowane z zakresu korelacyjnego w oparciu o wykonany test Grubbsa, przeprowadzony po transformacji rozkładu metodą Boxa–Coxa dla możliwości zastosowania testu Grubbsa.

Ocena korelacji stanów czujnika wykonana została dla łącznej liczby trzech geometrii dławienia i czterech zakresów przepływu objętościowego przy 10 czujnikach, skutkując współczynnikiem korelacji Pearsona na poziomie 90,4%, czyli wartością przekraczającą przyjęte kryterium 90% dla ocenianej populacji korelowanej. Przyjęta metoda korelacji zakładała korelację pomiędzy stanami czujnika, będącymi bezwymiarowymi wartościami odpowiadającymi ciśnieniu z wartościami symulowanymi, będącymi wartościami wyrażanymi w Pa. Możliwe było podjęcie dodatkowego kroku kalibracji czujników przez wykonanie badania korelacji zmiany zadanego ciśnienia statycznego w zbiorniku z wartościami stanów poszczególnych czujników, dla wykreślenia maczyzy przyporządkowania wartości empirycznej wyrażonej w Pa do wartości stanów czujnika. Pozwoliłoby to, aby korelacja wykonana była w korespondujących jednostkach dla wartości empirycznych i wartości symulowanych. Nie wykonano wspomnianego dodatkowego kroku kalibracji z uwagi na charakter liniowy pracy przekaźników ciśnienia oraz punkt referencyjny przekaźnika w postaci ciśnienia atmosferycznego – taka translacja danych empirycznych dla korelacji skutkowałaby wyłącznie zmianą skali jednej z osi wykresu korelacji, nie zmieniając ocenianego współczynnika korelacji Pearsona dla badania.

Cechy statystyczne zjawisk hydraulicznych jako metoda pośredniego opisu stopnia chemicznego wykorzystania potencjału pojemności jonowej surowca

W toku opisanych badań jako krytyczne dla optymalizacji wykorzystania pojemności jonowej surowca parametry wykorzystano policzalne miary rozproszenia prędkości liniowych przepływu w ujęciu objętości symulowanej surowca.

Kryterium zostało dobrane w oparciu o analizę dynamiki wymiany jonowej oraz podstawowe cechy przepływu w objętości. Pojemność jonowa surowca jako pojęcie odnosi się do liczby jonów Ca^{2+} oraz Mg^{2+} , które mogą zostać wychwycone i związane grupami funkcyjnymi powierzchni aktywnej granulatu jonitowego na jednostkę objętości pozornej granulatu jonitowego wyrażonej w litrach. Przyjmując, z uwagi na homogenizację cech surowca komercyjnego granulatu wymiany jonowej, że każda skończona część objętości złoża cechuje się porównywalną zdolnością wychwyty jonów, stopień wykorzystania pojemności dostępnej w całości złoża w przepływie rzeczywistym będzie zależny od tego, jak rozproszone w czasie będzie nasycenie jonami poszczególnych elementarnych objętości.

Czas, dla którego dojdzie do całkowitego wykorzystania dostępnych grup funkcyjnych elementarnej części objętości złoża, będzie zależny od zagęszczenia jonów wewnątrz rozważanej elementarnej objętości w funkcji czasu, a tym samym będzie funkcją gradientu stężeń jonowych oraz dywergencji pola skończonych strumieni objętości odpowiadającej dywergencji wektorów prędkości liniowej płynu. Z uwagi na przyjęte założenie jednorodności pola stężeń jonowych, z uwagi na pojedynczy parametr stężenia jonowego w strumieniu źródłowym, rozproszenie w czasie momentu wysycenia będzie zależne bezpośrednio od cech dywergencji pola wektorowego prędkości liniowych w przepływie w filtrze jonitowym.

Biorąc pod uwagę powyższe rozumowanie, jako kryterium optymalizacji przyjęto, że dla modelu symulacyjnego numeryczny opis statystycznych cech rozproszenia wartości prędkości liniowych w komórkach obliczeniowych siatki może być skutecznym parametrem, którego minimalizacja odpowiada przyrostowi wykorzystania całkowitej pojemności jonowej badanego złoża przez dążenie do homogenizacji tempa wymiany jonowej w homogenicznym chemicznie złożu. Założenie pomija wpływ dynamicznej zmiany stężeń jonowych w płynie wynikającej z aktywnej wymiany jonowej w przepływie przez jonit, jednak wprowadzenie do rozważań dodatkowej zmienności skutkowałoby koniecznością stosowania optymalizacji wielokryterialnej, wymagającej określenia funkcji celu[104]. Z uwagi na brak analitycznego modelu numerycznego pozwalającego na efektywną ocenę wpływu zmiany parametrów geometrycznych na kryterium skutkowałoby to koniecznością prowadzenia zautomatyzowanych pętli iteracyjnych geometrii w środowisku CFD. Rozwiązanie takie nie było możliwe choćby z uwagi na fakt, że każdorazowa zmiana siatki symulacyjnej wymaga oceny merytorycznej parametrów jakościowych, konieczności porównania parametrów celu dla zestawu przyjętych warunków brzegowych tudzież z uwagi na ograniczone możliwości definiowania funkcji celu w symulacji.

Alternatywnym podejściem dla wykonania oceny byłoby przeprowadzenie pomiarów pojemności jonowej dla konstrukcji w funkcji zmian geometrii zbiornika (przebrojenia otworu dławiącego) oraz zmian parametrów przepływu, jednak z uwagi na zbadany uprzednio duży wpływ procesu regeneracji solankowej żywicy jonowymiennej takie badanie obarczone mogłoby być istotnym błędem. Dodatkowym aspektem byłaby kosztowność czasowa dla takiego badania – pomiar pojemności jonowej w oparciu o pomiar resztkowej zawartości jonów Ca^{2+} i Mg^{2+} metodą EDTA to czasochłonne badanie analityczne, w którym dla uzyskania istotnego statystycznie wyniku konieczne byłoby wykonanie ok. 18 badań chemicznych dla każdego punktu pomiarowego, skutkując bardzo wysokim nakładem pracy dla możliwości wykreślenia funkcji empirycznej pojemności jonowej w argumentach zmian geometrii i warunków brzegowych badania.

Przeprowadzona ocena rozproszenia rozkładów prędkości została oparta na przybliżeniach statystycznych bazujących na danych klastrowanych histogramów prędkości pozyskanych z oprogramowania Ansys Fluent z uwagi na duże trudności z przetworzeniem zakresu danych surowych przy dobranych i zwalidowanych w MIS rozmiarach siatki. Przybliżenie statystyczne oparte na danych klastra jest obarczone pewnym błędem, zależnym od liczby klastrów przypadających na główny przedział 3-s funkcji gęstości prawdopodobieństwa reprezentowanej przez histogram. Dla weryfikacji stopnia wymaganego zagęszczenia klastrów możliwe byłoby przeprowadzenie analizy przypominającej analizę MIS – badającej wpływ zwiększania rozdzielczości histogramu (przez zmniejszanie rozmiarów klastrów przy niezmiennym zakresie danych) na zmianę wartości badanych statystycznych cech rozproszenia dla ustalenia najbardziej odpowiedniego zagęszczenia danych dla pozyskania przybliżeń statystycznych. Analiza taka nie została przeprowadzona z uwagi na charakter fizyczny badanej cechy oraz kalkulowaną dokładność odwzorowania zachowania rzeczywistego przez model symulacyjny – przyjęta liczba klastrów na poziomie $N = 100$ dawała rozdzielczość na poziomie 1% dobranego zakresu, z czego dobrany zakres stanowił ok. trzy-, czterokrotności rozstępu badanej wartości, skutkując efektywną rozdzielczością klastra

na poziomie ok. 3–4% występujących wartości przy współczynniku korelacji Pearsona na poziomie 90,4%. Ponadto dla dobranego zakresu prędkości 0–0,05 m/s uzyskano rozmiar klastra na poziomie różnicy 500 $\mu\text{m/s}$, co z fizycznego punktu widzenia dla przepływów skali strumienia w zakresie 1,1–2,6 l/min jest wartością wystarczająco małą dla szczegółowego opisu różnic w rozkładzie. Przeprowadzona ocena wizualna zmian w rozkładach prędkości oraz ciśnienia w przekroju centralnym w skali kolorystycznej dobranej dla ujednoczenia legendy wszystkich zaprezentowanych przekrojów zbiornika wykazała ledwo zauważalne zmiany kształtów izolinii prędkości i ciśnienia w funkcji zmian geometrii dławienia.

W odniesieniu do analizy rozkładów statystycznych zmiany estymowanych miar rozproszenia prędkości były zauważalne dla wszystkich rozpatrywanych miar. Największe wartości różnic ilorazu odchylenia standardowego populacji prędkości (*velocity magnitude*) oraz średniej wartości populacji prędkości (*velocity magnitude*) zauważalne były dla przypadku wariantu geometrycznego o wymiarze dławienia 1,3 mm i wyniosły odpowiednio 5,52% dla 1,1 l/min, 5,22% dla 1,6 l/min, 5,11% dla 2,1 l/min oraz 5,2% dla 2,6 l/min względem próbek populacji o najwyższych wartościach miar parametru.

Z perspektywy przemysłowej, w skali produkcji wielkoseryjnej, wartość zmiany tak rozumianej wydajności surowca przekraczająca 5% w ramach zakresu symulowanego jest wynikiem wartym wdrożenia; na przykładzie pojedynczego produktu wykorzystującego ok. 440 g żywicy w skali produkcyjnej 2 mln sztuk rocznie oszczędność surowca przekroczyłaby wartość 44 ton w skali roku, co przy przybliżonych cenach surowca na pierwszy kwartał 2024 roku skutkowałoby rocznymi oszczędnościami w koszcie materiału rzędu ok. 100 tys. €. Jest to wartość istotna nawet w perspektywie porównania geometrii każdorazowo wykorzystującej rozwiązanie techniczne regulacji ciśnienia przez centralny kanał z elementem dławiącym. Wartość procentowa otrzymanej zmiany opisanego kryterium homogeniczności przepływu dotyczy wyłącznie przypadku zastosowania rozwiązania konstrukcyjnego, nie porównując homogeniczności rozwiązania nie stosującego konstrukcji pozwalającej na regulację przepływu. Zakres wyników badań oceny wstępnej zdatności rozwiązania wykonany z pomocą pakietu symulacyjnego Solidworks Flow Simulation wskazuje, że szacowany wzrost tak rozumianej homogeniczności przepływu względem rozwiązania nie stosującego konstrukcji regulatora przepływu filtracyjnego byłby istotnie wyższy niż podany wynik zmienności w ramach zakresu prowadzonej optymalizacji.

Dodatkowo korzystne z perspektywy uzasadnienia finansowego wdrożenia rozwiązania byłoby porównanie miar rozproszenia dla wariantu niewykorzystującego dławienia lub wykorzystującego wymiar dławienia o wymiarze 0 mm. Z uwagi na czasochłonność symulacji oraz przeprowadzone wstępne badanie potwierdzające skuteczność metody w ramach środowiska SolidWorks Flow Simulation badanie takie nie zostało ponownie przeprowadzone w środowisku Ansys Fluent.

Ponadto korzystne z perspektywy naukowej byłoby przeprowadzenie empirycznego badania metodą EDTA geometrii badawczej o większym kroku iteracji wymiaru dławienia i skorelowanie wyników z kalkulowanymi w oparciu o symulacje miarami rozproszenia dla obliczenia szczegółowej zależności pomiędzy dobranym wskaźnikiem prowadzonej optymalizacji a rzeczywistą zmianą pojemności jonowej w funkcji zmiany miar rozproszenia prędkości. Badanie takie z uwagi na bardzo wysoki koszt czasowy i materiałowy badań metodą EDTA nie zostało włączone do planowanego toku prac w ramach planu badawczego.

6 Wnioski

W rozprawie osiągnięto cel pracy w postaci opracowania metody optymalizacji wymiaru regulacyjnego ciśnienia w konstrukcji opisywanego autorskiego rozwiązania technicznego.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano:

- skuteczność rozwiązania konstrukcyjnego w kształtowaniu zmian pola wektorowego przepływu w filtrze w warunkach ustalonych;
- poprawność przyjętej metodyki badawczej dobranej dla procesu oceny odwzorowania zachowania rzeczywistego modelu w modelu symulacyjnym;
- możliwość przeprowadzenia oceny porównawczej homogenizacji przepływu filtracyjnego przy pomocy oceny miar rozproszenia populacji symulowanych prędkości w ramach modelu dyskretnego rozwiązania technicznego.

Wykazano ponadto, że dla rozpatrywanego wariantu geometrycznego i badanego zakresu wymiarowego lokalne maksimum homogenizacji prędkości przepływu filtracyjnego występuje dla wymiaru oscylującego w okolicy 1,3 mm. Lokalne maksimum przedstawione w skali procentowej zmiany osiągało wartości uzasadniające ekonomicznie stosowanie rozwiązania w skali przemysłowej produkcji – zmiana parametru względem wyników badanego pola przekraczała 5% . Kwestią dyskusyjną jest istotność skali procentowej różnicy jednorodności pomiędzy wariantami w ujęciu zmierzonej dokładności wykorzystanych do walidacji modelu CFD czujników ciśnienia.

Wniosek: wykorzystanie metody substytucji parametru chemicznego skorelowanym parametrem hydraulicznym pozwala na efektywne wykorzystanie metod wspomagania komputerowego projektowania (CAE), a dokładniej: symulacji przepływu (CFD) jako kwantyfikatora kryterium optymalizacyjnego pojedynczego celu. Tym samym, w zakresie postawionej tezy potwierdzono, że możliwe jest wykorzystanie innowacyjnej metody projektowania dla zwiększenia jednorodności wykorzystania żywicy wymiany jonowej.

Kierunki dalszych badań

Kierunki dalszych badań powinny obejmować w pierwszej kolejności ocenę korelacji przyjętej metodyki z bezpośrednim pomiarem chemicznym efektywności, dla skorygowania otrzymanych wyników o zmianę przepuszczalności złoża wskutek zjawisk kompaktacji, nieuwziętych w rozważaniach oraz dla weryfikacji wpływu dokładności zastosowanych czujników ciśnienia w badaniu empirycznym na poziom odwzorowania zachowania rzeczywistego w przyjętej metodyce strojenia symulacji. Korelacja empirycznie zmierzonego stopnia wykorzystania pojemności nie została ujęta w zakresie definiowanego na początku prac planu badawczego dla opracowania metodyki optymalizacji. Badanie korelacyjne pozwoli na przewidywanie szczegółowych wartości pojemności jonowej systemu w przewidywanych warunkach pracy dla opracowanej metodyki optymalizacji konstrukcyjnej celu. Pozwoli to na wykorzystanie opracowanej metodyki jako uniwersalnego narzędzia wstępnej walidacji konceptu konstrukcyjnego wg wytycznych specyfikacyjnych produktów różnych producentów AGD.

7 Bibliografia

- [1] A. E. Killebrew, M. Steiner, A. N. Goring-Morris, i A. Belfer-Cohen, „The Southern Levant (Cisjordan) During the Neolithic Period”, w *The Oxford Handbook of the Archaeology of the Levant*, A. E. Killebrew i M. Steiner, Red., Oxford University Press, 2013. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199212972.013.011.
- [2] J. Houghton i O. Ogden, „US 73665- Table furniture cleaning machine”, 14.05.1850.
- [3] K. Jin Tae, L. Jae Chul, K. Seokhyun, i H. Jukwang, „DISHWASHER”, US2024057842A1, 22 luty 2024
- [4] Związek Pracodawców AGD APPLiA, „Raport rynku AGD 2022/2023”.
- [5] J. L. Brown, „Mechanical dishwashing”, w *Current Concepts in Food Protection*, 1988, s. 43–56.
- [6] „EN 61770:2009/A1:2019 Electric appliances connected to the water mains- Avoidance of backsiphonage and failure of hose-sets”.
- [7] „Elektryczny sprzęt do użytku domowego i podobnego-- Bezpieczeństwo użytkowania-- Część 1: Wymagania ogólne”.
- [8] „Sprzęt elektryczny przyłączany do sieci wodociągowej-- Unikanie przepływu wstecznego i uszkodzeń węża kompletnego”. 7 listopad 2019.
- [9] ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2017/1369 z dnia 4 lipca 2017 r.
- [10] ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) 2019/2022 z dnia 1 października 2019 r. ustanawiające wymogi dotyczące ekoprojektu dla zmywarek do naczyń dla gospodarstw domowych na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE, zmieniająca rozporządzenie Komisji (WE) nr 1275/2008 oraz uchylająca rozporządzenie Komisji (UE) nr 1016/2010.
- [11] S. L. Heinzle i R. Wüstenhagen, „Dynamic Adjustment of Eco-labeling Schemes and Consumer Choice – the Revision of the EU Energy Label as a Missed Opportunity?”, *Bus Strat Env*, t. 21, nr 1, s. 60–70, sty. 2012, doi: 10.1002/bse.722.
- [12] M. A. Andor, A. Gerster, i L. Götte, „How effective is the European Union energy label? Evidence from a real-stakes experiment”, *Environ. Res. Lett.*, t. 14, nr 4, s. 044001, mar. 2019, doi: 10.1088/1748-9326/ab05fe.
- [13] W. Wang, X. Liu, Z. Shi, i H. Liu, „Investigation of heat transfer and energy distribution inside dishwasher based on a coupled 3D-1D simulation method”, *Case Studies in Thermal Engineering*, t. 49, s. 103355, wrz. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103355.
- [14] C. Alejandro, O. Akizu-Gardoki, i E. Lizundia, „Optimum operational lifespan of household appliances considering manufacturing and use stage improvements via life cycle assessment”, *Sustainable Production and Consumption*, t. 32, s. 52–65, lip. 2022, doi: 10.1016/j.spc.2022.04.007.
- [15] „Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/ z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie baterii i zużytych baterii, zmieniające dyrektywę 2008/98/WE i rozporządzenie (UE) 2019/1020 oraz uchylające dyrektywę 2006/66/WE”.
- [16] „GE Appliance Unveils New \$80 Million Dishwasher Manufacturing Line”. Dostęp: 16 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.assemblymag.com/articles/96253-ge-appliance-unveils-new-80-million-dishwasher-manufacturing-line>
- [17] G. Karakiş, „Chinese white goods producer invests 85 mln euros in Turkey’s Eskişehir”. Dostęp: 25 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.hurriyetdailynews.com/chinese-white-goods-producer-invests-85-mln-euros-in-turkeys-eskisehir-168894>
- [18] „Zdjęcia linii produkcyjnych zmywarek producenta przemysłowych linii produkcyjnych QS-Group”. QS Group. Dostęp: 2 kwiecień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.qs-group.com/sheet-metal-division/dishwasher-production-lines/>
- [19] B. Catoen i H. Rees, *Injection mold design handbook*. Munich: Hanser Publishers, 2021.

- [20] R. Farooque, M. Asjad, i S. J. A. Rizvi, „A current state of art applied to injection moulding manufacturing process – A review”, *Materials Today: Proceedings*, t. 43, s. 441–446, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.967.
- [21] L. W. Seow i Y. C. Lam, „Optimizing flow in plastic injection molding”, *Journal of Materials Processing Technology*, t. 72, nr 3, s. 333–341, grudz. 1997, doi: 10.1016/S0924-0136(97)00188-X.
- [22] K. Annamalai, C. D. Naiju, S. Karthik, i M. M. Prashanth, „Early Cost Estimate of Product during Design Stage Using Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) Principles”, *AMR*, t. 622–623, s. 540–544, grudz. 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.622-623.540.
- [23] G. Boothroyd, P. Dewhurst, i W. A. Knight, *Product design for manufacture and assembly*, 2nd ed., rev. Expanded. w *Manufacturing engineering and materials processing*, no. 58. New York: M. Dekker, 2002.
- [24] D. L. Taylor, *Computer-aided design*. w Addison-Wesley series in mechanical engineering. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1992.
- [25] T.-C. Chang, R. A. Wysk, i H.-P. Wang, *Computer-aided manufacturing*, 2nd ed. w Prentice Hall international series in industrial and systems engineering. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1998.
- [26] M. J. Kobielski, W. Skarka, M. Mazur, i D. Kądziaława, „Evaluation of Strong Cation Ion-Exchange Resin Cost Efficiency in Manufacturing Applications—A Case Study”, *Polymers*, t. 14, nr 12, s. 2391, cze. 2022, doi: 10.3390/polym14122391.
- [27] „Portal Espacenet.com”. worldwide.espacenet.com. Dostęp: 1 luty 2024. [Online]. Dostępne na: worldwide.espacenet.com
- [28] C. Gabrielli, G. Maurin, H. Francy-Chausson, P. Thery, T. T. M. Tran, i M. Tlili, „Electrochemical water softening: principle and application”, *Desalination*, t. 201, nr 1–3, s. 150–163, lis. 2006, doi: 10.1016/j.desal.2006.02.012.
- [29] European Commission. Joint Research Centre., *Durability assessment of products: analysis and testing of washing machines*. LU: Publications Office, 2018. Dostęp: 9 luty 2024. [Online]. Dostępne na: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/115684>
- [30] R. J. Farn, Red., *Chemistry and technology of surfactants*. Oxford ; Ames, Iowa: Blackwell Pub, 2006.
- [31] O. C. Bacon i J. E. Smith, „Mechanical Work as a Measure of Efficiency of Surface Active Agents in Removing Soil”, s. 10, 1948.
- [32] D. Bajpai i V. K. Tyagi, „Laundry Detergents: An Overview”, *J. Oleo Sci.*, t. 56, nr 7, s. 327–340, 2007, doi: 10.5650/jos.56.327.
- [33] A. Pezzin, M. Giansetti, i A. Ferri, „Influence of Limescale on Heating Elements Efficiency”, s. 1.
- [34] C. Jullien, T. Bénézéch, B. Carpentier, V. Lebrete, i C. Faille, „Identification of surface characteristics relevant to the hygienic status of stainless steel for the food industry”, *Journal of Food Engineering*, t. 56, nr 1, s. 77–87, sty. 2003, doi: 10.1016/S0260-8774(02)00150-4.
- [35] M. Mauermann, U. Eschenhagen, Th. Bley, i J.-P. Majschak, „Surface modifications – Application potential for the reduction of cleaning costs in the food processing industry”, *Trends in Food Science & Technology*, t. 20, s. S9–S15, sty. 2009, doi: 10.1016/j.tifs.2009.01.020.
- [36] W. Liu, P. J. Fryer, Z. Zhang, Q. Zhao, i Y. Liu, „Identification of cohesive and adhesive effects in the cleaning of food fouling deposits”, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, t. 7, nr 4, s. 263–269, grudz. 2006, doi: 10.1016/j.ifset.2006.02.006.
- [37] S. Al-Asheh i A. Aidan, „A Comprehensive Method of Ion Exchange Resins Regeneration and Its Optimization for Water Treatment”, w *Promising Techniques for Wastewater Treatment and Water Quality Assessment*, I. Ahmed Moujдин i J. Kevin Summers, Red., IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.93429.
- [38] Y. Wang, „Ion Exchange Resin in Hemoperfusion”, w *Regenerative Medicine, Artificial Cells and Nanomedicine*, t. 04, WORLD SCIENTIFIC, 2017, s. 341–384. doi: 10.1142/9789814749084_0014.

- [39] L. Lazar, B. Bandrabur, R.-E. Tataru-Farmus, M. Drobota, L. Bulgariu, i G. Gutt, „FTIR ANALYSIS OF ION EXCHANGE RESINS WITH APPLICATION IN PERMANENT HARD WATER SOFTENING”, *Environ. Eng. Manag. J.*, t. 13, nr 9, s. 2145–2152, 2014, doi: 10.30638/eemj.2014.237.
- [40] C. Özmetin, Ö. Aydın, M. M. Kocakerim, M. Korkmaz, i E. Özmetin, „An empirical kinetic model for calcium removal from calcium impurity-containing saturated boric acid solution by ion exchange technology using Amberlite IR–120 resin”, *Chemical Engineering Journal*, t. 148, nr 2–3, s. 420–424, maj 2009, doi: 10.1016/j.cej.2008.09.021.
- [41] A. Baimenov, D. Berillo, S. Azat, T. Nurgozhin, i V. Inglezakis, „Removal of Cd²⁺ from Water by Use of Super-Macroporous Cryogels and Comparison to Commercial Adsorbents”, *Polymers*, t. 12, nr 10, s. 2405, paź. 2020, doi: 10.3390/polym12102405.
- [42] R. Das, M. Kuehnert, A. Sadat Kazemi, Y. Abdi, i A. Schulze, „Water Softening Using a Light-Responsive, Spiropyran-Modified Nanofiltration Membrane”, *Polymers*, t. 11, nr 2, s. 344, luty 2019, doi: 10.3390/polym11020344.
- [43] S.-J. Seo *i in.*, „Investigation on removal of hardness ions by capacitive deionization (CDI) for water softening applications”, *Water Research*, t. 44, nr 7, s. 2267–2275, kwi. 2010, doi: 10.1016/j.watres.2009.10.020.
- [44] B. Lee, N. Park, K. S. Kang, H. J. Ryu, i S. H. Hong, „Enhanced Capacitive Deionization by Dispersion of CNTs in Activated Carbon Electrode”, s. 31.
- [45] X. Zhang i D. Reible, „Theoretical Analysis of Constant Voltage Mode Membrane Capacitive Deionization for Water Softening”, *Membranes*, t. 11, nr 4, s. 231, mar. 2021, doi: 10.3390/membranes11040231.
- [46] M. Andelman, „Flow Through Capacitor basics”, *Separation and Purification Technology*, t. 80, nr 2, s. 262–269, lip. 2011, doi: 10.1016/j.seppur.2011.05.004.
- [47] R. Das *i in.*, „Recent advances in nanomaterials for water protection and monitoring”, *Chem. Soc. Rev.*, t. 46, nr 22, s. 6946–7020, 2017, doi: 10.1039/C6CS00921B.
- [48] P. Čuda, P. Pospíšil, i J. Tenglerová, „Reverse osmosis in water treatment for boilers”, *Desalination*, t. 198, nr 1–3, s. 41–46, paź. 2006, doi: 10.1016/j.desal.2006.09.007.
- [49] M. Andelman, „FLOW-THROUGH CAPACITOR AND CHROMATOGRAPHIC SYSTEM AND METHOD”, WO9521674A1
- [50] M. Andelman, „Method of separating ionic fluids with a flow through capacitor”, US5547581A
- [51] „Parametry produkowanej wody, Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S.A.” [Online]. Dostępne na: <https://www.gpw.katowice.pl/nasze-uslugi/zaopatrzenie-w-wode/parametry-produkowanej-wody>
- [52] „Komunikat Gdańskich Wodociągów S.A. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi wodociąg m. Gdańska- styczeń 2024r.” Dostęp: 9 luty 2024. [Online]. Dostępne na: https://www.gdanskiewodociagi.pl/Portals/2/dok/jakosc_wody/komunikat-jakosc_wody.pdf?ver=2023-08-02-085659-267
- [53] M. Hájek *i in.*, „A European map of groundwater pH and calcium”, *Earth Syst. Sci. Data*, t. 13, nr 3, s. 1089–1105, mar. 2021, doi: 10.5194/essd-13-1089-2021.
- [54] H. Schlichting i K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-52919-5.
- [55] S. Bhattacharyya, J. P. Abraham, L. Cheng, i J. Gorman, „Introductory Chapter: A Brief History of and Introduction to Computational Fluid Dynamics”, w *Applications of Computational Fluid Dynamics Simulation and Modeling*, S. Bhattacharyya, Red., IntechOpen, 2022. doi: 10.5772/intechopen.97235.
- [56] J. Fredsøe, *Hydrodynamik*, 3. udg. Lyngby: Den Private Ingeniørfond, Danmarks Tekniske Universitet, 1994.
- [57] A. Szymkiewicz, „Mathematical Models of Flow in Porous Media”, w *Modelling Water Flow in Unsaturated Porous Media*, w GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, s. 9–47. doi: 10.1007/978-3-642-23559-7_2.

- [58] J. P. Du Plessis i J. H. Masliyah, „Mathematical modelling of flow through consolidated isotropic porous media”, *Transp Porous Med*, t. 3, nr 2, s. 145–161, kwi. 1988, doi: 10.1007/BF00820342.
- [59] J. P. Franc i J. M. Michel, *Franc, J. P., & Michel, J. M. (2006). Fundamentals of cavitation (Vol. 76)*, 76. wyd. Springer science & Business media., 2006.
- [60] I. S. Pearsall, „Cavitation”, *Chartered Mechanical Engineer*, t. 21.7, 1974.
- [61] A. Jafarian, Isfahan University of Technology, A.-R. Pischevar, i Mechanical Engineering department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, „Numerical Simulation of Steady Supercavitating Flows”, *JAFM*, t. 9, nr 6, s. 2981–2992, lis. 2016, doi: 10.29252/jafm.09.06.26209.
- [62] F. R. Young, *Cavitation*. London: Imperial College Press, 1999.
- [63] Newton, Isaac, *Opticks: Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light.*, 1. wyd. w 1. William and John Innys, 1704.
- [64] A. Vecherkovskaya i S. Popereshnyak, „Mathematical modeling of the process of fluid filtration through a multi-layer filtering element”, *TAPR*, t. 4, nr 3(36), s. 9–13, lip. 2017, doi: 10.15587/2312-8372.2017.109309.
- [65] H. Darcy, *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau : Ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes, au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tôle et de bitume*, t. 2. Victor Dalmont, 1856.
- [66] J. Bear i M. Y. Corapcioglu, Red., *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. doi: 10.1007/978-94-009-6175-3.
- [67] D. A. Nield, „Modelling Fluid Flow in Saturated Porous Media and at Interfaces”, w *Transport Phenomena in Porous Media II*, Elsevier, 2002, s. 1–19. doi: 10.1016/B978-008043965-5/50002-7.
- [68] P. Kundu, V. Kumar, i I. M. Mishra, „Experimental and numerical investigation of fluid flow hydrodynamics in porous media: Characterization of pre-Darcy, Darcy and non-Darcy flow regimes”, *Powder Technology*, t. 303, s. 278–291, grudz. 2016, doi: 10.1016/j.powtec.2016.09.037.
- [69] J. M. Thijssen, *Computational physics*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [70] I. Gomez, A. Gonzalez-Mancera, B. Newell, i J. Garcia-Bravo, „Analysis of the Design of a Poppet Valve by Transitory Simulation”, *Energies*, t. 12, nr 5, s. 889, mar. 2019, doi: 10.3390/en12050889.
- [71] R. L. Panton, *Incompressible flow*, 2. ed. w A Wiley-Interscience publication. New York Chichester: Wiley, 1996.
- [72] P. K. Kundu i I. M. Cohen, *Fluid mechanics*, 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2002.
- [73] B. Haddadi, C. Jordan, i M. Harasek, „Cost efficient CFD simulations: Proper selection of domain partitioning strategies”, *Computer Physics Communications*, t. 219, s. 121–134, paź. 2017, doi: 10.1016/j.cpc.2017.05.014.
- [74] R. Rituraj i R. Scheidl, „Towards digital twin development of counterbalance valves: Modelling and experimental investigation”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, t. 188, s. 110049, kwi. 2023, doi: 10.1016/j.ymsp.2022.110049.
- [75] F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, i P. Ji, „Digital twin modeling”, *Journal of Manufacturing Systems*, t. 64, s. 372–389, lip. 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.06.015.
- [76] E. Lisowski, G. Filo, i J. Rajda, „Pressure compensation using flow forces in a multi-section proportional directional control valve”, *Energy Conversion and Management*, t. 103, s. 1052–1064, paź. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.07.038.
- [77] E. Lisowski i G. Filo, „Analysis of a proportional control valve flow coefficient with the usage of a CFD method”, *Flow Measurement and Instrumentation*, t. 53, s. 269–278, mar. 2017, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.12.009.

- [78] M. Laney i R. Farrell, „Piston-Lift Check Valve Flow Verification Using CFD”, w *Volume 7: Operations, Applications, and Components*, Prague, Czech Republic: American Society of Mechanical Engineers, lip. 2018, s. V007T07A023. doi: 10.1115/PVP2018-84672.
- [79] U. Umatheva, G. Chen, i R. Ghosh, „Computational fluid dynamic (CFD) simulation of a cuboid packed-bed chromatography device”, *Chemical Engineering Research and Design*, t. 152, s. 393–401, grudz. 2019, doi: 10.1016/j.cherd.2019.10.005.
- [80] C. Kloss, C. Goniva, A. Hager, S. Amberger, i S. Pirker, „Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM”, *PCFD*, t. 12, nr 2/3, s. 140, 2012, doi: 10.1504/PCFD.2012.047457.
- [81] Department of Mechanical, Faculty of Engineering and technology, University of Botswana, P.O. Box 0061, Gaborone, Botswana., P. I. Muiruri, O. S. Motsamai, i Department of Mechanical, Faculty of Engineering and technology, University of Botswana, P.O. Box 0061, Gaborone, Botswana., „Three Dimensional CFD Simulations of A Wind Turbine Blade Section; Validation”, *JESTR*, t. 11, nr 1, s. 138–145, luty 2018, doi: 10.25103/jestr.111.16.
- [82] G. Tschirschnitz i P. Sabrowski, „Computational Fluid Dynamics Methods Explained Types of Methods and Their Uses”. Dostęp: 21 kwiecień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.dive-solutions.de/blog/cfd-methods>
- [83] A. Grucelski i J. Pozorski, „Modelowanie z wykorzystaniem metody siatkowej Boltzmann termomechaniki przepływu wraz z reakcjami chemicznymi”, *ZN PRz Mechanika*, t. 31, nr 86(3/2014), s. 357–366, 2014, doi: 10.7862/rm.2014.39.
- [84] S. Succi, *The lattice Boltzmann equation for fluid dynamics and beyond*. w Numerical mathematics and scientific computation. Oxford : New York: Clarendon Press ; Oxford University Press, 2001.
- [85] T. Norton i D.-W. Sun, „Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review”, *Trends in Food Science & Technology*, t. 17, nr 11, s. 600–620, lis. 2006, doi: 10.1016/j.tifs.2006.05.004.
- [86] M. Miltner, A. Miltner, M. Harasek, i A. Friedl, „Process simulation and CFD calculations for the development of an innovative baled biomass-fired combustion chamber”, *Applied Thermal Engineering*, t. 27, nr 7, s. 1138–1143, maj 2007, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.02.048.
- [87] S. Barber, A. Schubiger, S. Koller, A. Rumpf, H. Knaus, i H. Nordborg, „Actual Total Cost reduction of commercial CFD modelling tools for Wind Resource Assessment in complex terrain”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, t. 1618, nr 6, s. 062012, wrz. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1618/6/062012.
- [88] M. N. Dhaubhadel, „Review: CFD Applications in the Automotive Industry”, *Journal of Fluids Engineering*, t. 118, nr 4, s. 647–653, grudz. 1996, doi: 10.1115/1.2835492.
- [89] L. Raynal, F. Augier, F. Bazer-Bachi, Y. Haroun, i C. Pereira Da Fonte, „CFD Applied to Process Development in the Oil and Gas Industry – A Review”, *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies nouvelles*, t. 71, nr 3, s. 42, maj 2016, doi: 10.2516/ogst/2015019.
- [90] F. T. Johnson, E. N. Tinoco, i N. J. Yu, „Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle”, *Computers & Fluids*, t. 34, nr 10, s. 1115–1151, grudz. 2005, doi: 10.1016/j.compfluid.2004.06.005.
- [91] B. Schilder *i in.*, „CFD Enhanced Thermal Spray Process for Coating of Cylinder Bores of Car Engines”, *J Therm Spray Tech*, t. 29, nr 4, s. 546–559, kwi. 2020, doi: 10.1007/s11666-020-01011-y.
- [92] A. Flaga-Maryńczyk, „Modelowanie CFD i badania aerodynamiczne żaluzji wywiewnych”, *District Heating, Heating, Ventilation*, t. 1, nr 2, s. 33–37, luty 2018, doi: 10.15199/9.2018.2.6.
- [93] Z. Rek, M. Rudolf, i I. Zun, „Application of CFD Simulation in the Development of a New Generation Heating Oven”, *SV-JME*, t. 58, nr 2, s. 134–144, luty 2012, doi: 10.5545/sv-jme.2011.163.
- [94] K. Stefan i R. Gunther, „CFD-Simulations in the Early Product Development”, *Procedia CIRP*, t. 40, s. 443–448, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.090.
- [95] M. J. Kobielski, „WATER SOFTENING DEVICE”, WO2021203313A1

- [96] L. L. Bridgewater *i in.*, Red., *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.
- [97] E. R. Gilliland i R. F. Baddour, „Rate of Ion Exchange”, *Ind. Eng. Chem.*, t. 45, nr 2, s. 330–337, luty 1953, doi: 10.1021/ie50518a029.
- [98] A. A. Zagorodni, *Ion exchange materials: properties and applications*, 1st ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2007.
- [99] M. J. Kobielski, W. Skarka, i M. Skarka, „Comparison of pressure-loss evaluation fidelity in turbulent energy dissipation models of poppet check valves using computational fluid dynamics (CFD) software”, *ts*, luty 2024, doi: 10.31648/ts.9732.
- [100] „Ansys Fluent User’s Guide, Release 2022 R2ANSYS”. Ansys, Inc., 1 lipiec 2022. [Online]. Dostępne na: <https://ansyshelp.ansys.com/>
- [101] G. Filo, E. Lisowski, i J. Rajda, „Design and Flow Analysis of an Adjustable Check Valve by Means of CFD Method”, *Energies*, t. 14, nr 8, s. 2237, kwi. 2021, doi: 10.3390/en14082237.
- [102] M. Huovinen, J. Kolehmainen, P. Koponen, T. Nissilä, i P. Saarenrinne, „Experimental and numerical study of a choke valve in a turbulent flow”, *Flow Measurement and Instrumentation*, t. 45, s. 151–161, paź. 2015, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.005.
- [103] K. J. Ives, „Filtration studied with endoscopes”, *Water Research*, t. 23, nr 7, s. 861–866, lip. 1989, doi: 10.1016/0043-1354(89)90010-9.
- [104] W. Beluch i A. Długosz, „Multiobjective global optimization of mechanical systems with cracks”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, t. 58, nr 2, s. 553–564, kwi. 2020, doi: 10.15632/jtam-pl/119092.

8 Spis ilustracji

Rys. 1 Schemat konstrukcyjny pierwszej chronionej przemysłowo zmywarki wg patentu Joela Houghtona z 1850 roku [2]	9
Rys. 2 Przykład aktualnego stanu techniki dla zmywarek – rysunki n. 2/7/14/21 patentu n. US 2024/0057842 A1 [3] zawierające rzuty konstrukcji rozwiązania oraz schemat logiczny sterowania inteligentnego.....	10
Rys. 3 Historyczny procent gospodarstw domowych wyposażonych w zmywarkę do naczyń w Polsce .	10
Rys. 4 Schemat ideowy relacji przykładowych układów hydraulicznych zmywarki domowej, opracowanie własne	11
Rys. 5 Schemat hydrauliczny przykładowej zmywarki domowej wyposażonej w kondensacyjny wymiennik ciepła, opracowanie własne.....	12
Rys. 6 Przekroje rynkowych przykładów dwóch stosowanych typów przerw powietrznych, za obowiązującą normą[6]	12
Rys. 7 Objaśnienie etykiety wydajności energetycznej Energy Label i objaśnienie indeksów wydajności energetycznej EEI[9], [10]	14
Rys. 8 Wykres kołowy obszarów utraty doprowadzonej do procesu zmywania energii cieplnej, pomiar w programie „eko” urządzenia klasy energetycznej A roku 2023, opracowanie własne	15
Rys. 9 Przykładowe linie integracyjne zmywarek domowych ze strony internetowej producenta QS-Group[18]	16
Rys. 10 Zestawienie przepływu procesów rozwoju platformy produktowej w scenariuszach 1) wykorzystania istniejących technologii i 2) rozwinięcia nowych technologii, opracowanie własne	18
Rys. 11 Proporcja udziału kosztu materiału i kosztu procesu w wytworzeniu produktu na przykładzie rzeczywistego zaworu wielodrożnego sterowanego silnikiem krokowym, dane własne	19
Rys. 12 Formularz CBD produktu rzeczywistego z określonymi danymi niejawnymi, dane własne.....	20
Rys. 13 Drzewo podziału typów komponentów zakupowych dla przykładowej zmywarki, opracowanie własne.....	22
Rys. 14 Udział masowy różnych typów surowca w kompletnym wyrobie na przykładzie pięciu typów komponentów układu hydraulicznego zmywarki, opracowanie własne.....	23
Rys. 15 Porównanie form wtryskowych od lewej: 1) forma złożona z hydrauliką i wieloetapowym odformowaniem, koszt rzędu ok. 50–55 k€; 2) forma typu open-close, koszt rzędu 8–10 k€	24
Rys. 16 Drzewo technologii zgrzewania wykorzystywanych w produkcji komponentów hydraulicznych dla zmywarek wraz z opisem technologii	27
Rys. 17 Schemat postępowania w metodyce DFMA, za źródłem[22].....	28
Rys. 18 Wykres opłacalności integracji funkcji dwóch elementów wtryskowych w jednym komponencie, z zaznaczonym punktem break-even – scenariusz hipotetyczny	29
Rys. 19 Schemat postępowania w rzeczywistym przykładzie optymalizacji kształtu wypraski obudowy komory suszącej dla zmywarki w funkcji ilości zużytego specjalistycznego termoplastu, opracowanie własne.....	30
Rys. 20 Porównanie strumieni procesu oceny swobody działania (FTO) oraz oceny patentowalności rozwiązania technologicznego (prior art), opracowanie własne	31
Rys. 21 Schemat przepływu procesu formułowania zapytania oraz zrzut drzewa query, za espacenet.com na przykładzie opisywanego rozwiązania	32
Rys. 22 Zapytanie serwisu espacenet.com w obszarze zmiękczenia, query: ipc all "A47L" AND (ctxt all "softening" OR ctxt all "deionization")) AND pd > "09.02.2004"	33
Rys. 23 Zestawienie rycin pozycji listowanych jako istotne w analizie stanu techniki EPO dla EP 3962867 A0.....	33

Rys. 24 Koło Sinnera dla czterech wariantów prania odzieży, za cytowaniem[29]	34
Rys. 25 Podział systematyczny[37] wymienników jonowych w funkcji chemii bazowej	36
Rys. 26 Podział systematyczny żywic wymiany jonowej opartych na matrycy styrenowej cross-linkowanej DVB[38].....	36
Rys. 27 Rysunki patentu US5547581A – przepływowego kondensatora dejonizującego wodę[50]	37
Rys. 28 Mapa rozkładu twardości wód przypowierzchniowych na terenie kontynentu europejskiego[53]	38
Rys. 29 Wizualizacja przekroju linii prędkości lokalnych, za metodą eksperymentalną Reynoldsa[56], z góry do dołu – od najmniejszej wartości Re do największej wartości Re.....	42
Rys. 30 Wykres zmiany fazy w procesie izotermicznym kawitacji[61]	43
Rys. 31 Przykładowa strategia opracowania modelu CFD wraz z walidacją empiryczną, za źródłem[81]	46
Rys. 32 Drzewo podziału typów modeli numerycznych dla komputerowych obliczeń symulacyjnych przepływu	47
Rys. 33 Mapa badawcza wg Indywidualnego Planu Badawczego, przedstawiona w systematyce UML, z podziałem na lata akademickie	51
Rys. 34 Modele CAD zmiękczacza wyjściowego badania (po lewej) oraz bazowego prototypu badawczego (po prawej) przed zastosowaniem koncepcji konstrukcyjnej regulacji ciśnienia	53
Rys. 35 Model CAD ze schematem szkicu nominalnych założeń geometrycznych regulacji (po lewej) oraz zamodelowany z zastosowaniem koncepcji konstrukcyjnej regulacji ciśnienia (po prawej)	53
Rys. 36 Schemat hydrauliczny układu pomiarowego dla prototypu referencyjnego producenta.....	54
Rys. 37 Zdjęcie prototypu badawczego referencji oraz wykres zmierzonego spadku ciśnienia w funkcji objętości strumienia wody.....	54
Rys. 38 Zrzut ekranu parametrów konfiguracyjnych ciała porowatego testu wstępnego symulacji w SolidWorks Flow Simulation.....	55
Rys. 39 Wizualizacja różnic zachowania pola skalarnego ciśnienia i pola wektorowego przepływu wskutek zastosowania opisanej koncepcji konstrukcyjnej.....	56
Rys. 40 Schemat cyklu pracy próbek jonitowych w teście pojemności wraz ze wskazaniem poboru próbki.....	57
Rys. 41 Schemat cyklu logicznego i czasowego pętli badania i pobierania próbek w teście pojemności jonowej.....	58
Rys. 42 Zdjęcie aparatury badawczej testera półautomatycznego pojemności jonowej żywicy	58
Rys. 43 Zdjęcie aparatury titracyjnej do prowadzenia testów chemicznych metodą EDTA	59
Rys. 44 Zbiornik wystandaryzowany testu pojemności jonowej.....	59
Rys. 45 Średnia pojemność jonowa próbek żywicy w fazie zmiękczenia 2–3, próbki 1–9	60
Rys. 46 Odchylenie standardowe pojemności jonowej próbek żywicy w fazie zmiękczenia 2–3, próbki 1–9.....	60
Rys. 47 Stosunek odchylenia standardowego pojemności jonowej próbek żywicy w fazie zmiękczenia 2–3 do średniej pojemności jonowej żywicy w fazie zmiękczenia 2–3, próbki 1–9.....	60
Rys. 48 Schemat głównego badania optymalizacyjnego konstrukcji	62
Rys. 49 Przekrój siatkowy modelu CAE Ansys Fluent – moduł Meshing dla urządzenia strojącego spadki hydrauliczne jonitu.....	63
Rys. 50 Wizualizacja rozkładów prędkości w przekroju wzdłużnym zbiornika oraz rozkładu ciśnień w płaszczyźnie granicznej filtra i przepływu bezwładnościowego urządzenia strojącego spadki hydrauliczne jonitu.....	64
Rys. 51 Wizualizacja gradientu ciśnienia wewnątrz domeny filtra żywicznego urządzenia strojącego spadki hydrauliczne jonitu	64
Rys. 52 Zdjęcie rolki zastosowanej siatki mesh o wymiarze oczka 0,2 m tkanej z drutu 0,15 mm.....	65

Rys. 53 Zdjęcie prototypu badawczego referencji zmierzonego spadku ciśnienia w funkcji prędkości liniowej przepływu dla kalibracji Ansys Fluent	65
Rys. 54 Schemat koncepcyjny zbiornika testu geometrii docelowej zawierającego element przezbrajalnej wkładki dławiącej.....	66
Rys. 55 Widok modelu CAD – SolidWorks (z lewej) oraz CAE SolidWorks Flow Simulation z zaznaczonymi pozycjami numeracji gniazd igieł pomiarowych p1–p10 (z prawej)	67
Rys. 56 Schemat logiczny docelowego urządzenia testowego dla kalibracji modelu CFD Ansys Fluent w oparciu o zestaw wewnętrznych czujników ciśnienia p1–p10.....	68
Rys. 57 Zdjęcie elementów drukowanych w technologiach MSLA/FFF użytych do integracji komory testowej	69
Rys. 58 Zdjęcie elementu przezbrajanego w wariancie wymiarowym 1,60 mm na tle siedziska elementu przezbrajanego w komorze jonitu	69
Rys. 59 Zdjęcie zintegrowanego zbiornika testowego geometrii docelowej z przezbrajanymi wkładkami dławiącymi na podstawie testowej	70
Rys. 60 Zdjęcia stacji badawczej, z lewej: widocznej od strony modułu akwizycji danych, z prawej: widocznej od strony portów ciśnienia.....	72
Rys. 61 Zdjęcie wykonane podczas procesu akwizycji danych w trakcie testu empirycznego zbiornika geometrii docelowej	73
Rys. 62 Zdjęcie kompletnego stanowiska pomiarowego zmontowanego z urządzeniem testowym geometrii docelowej na stanowisku laboratoryjnym	73
Rys. 63 Wykres średniego rozproszenia sygnału – odchylenia standardowego populacji punktów pomiarowych w funkcji wymiaru dławienia	75
Rys. 64 Widok domeny obliczeniowej bryły strojenia oporu filtra oraz geometrii wykluczonej z obliczeń, opracowane w programie Ansys Space Claim	76
Rys. 65 Widok przekroju siatki domeny obliczeniowej bryły strojenia oporu filtra – widok programu Ansys Fluent modułu Meshing.....	76
Rys. 66 Wykres zmierzonego poziomu ciśnienia przed wlotem do zbiornika w funkcji prędkości liniowej przepływu w kolumnie testowej	78
Rys. 67 Okno definicji parametrów ciała porowatego domeny obliczeniowej, Ansys Fluent.....	80
Rys. 68 Zestawienie przekroju siatkowego geometrii obliczeniowej na poziomie 400 tys. (po lewej) oraz 1 mln (po prawej).....	81
Rys. 69 Wykres procentowej zmiany wartości symulowanego parametru względem niższego kroku zagęszczenia	82
Rys. 70 Wykres ilorazu wartości obliczonej dla kroku zagęszczenia do średniej wartości obliczonej dla wszystkich badanych w MIS zakresów zagęszczenia	82
Rys. 71 Ogólny schemat postępowania wykorzystany w wykonanej analizie korelacji wyników symulacyjnych do wartości zmierzonych w teście empirycznym geometrii docelowej.....	83
Rys. 72 Wykresy prawdopodobieństwa dopasowania pola danych dla testowanych modeli rozkładu ..	86
Rys. 73 Histogram danych pomiarowych po eliminacji wartości odstających z dopasowanym rozkładem Weibulla.....	87
Rys. 74 Wykres korelacji stanu czujnika sond p1–p10 z ciśnieniami p1–p10 symulacji Ansys Fluent, korelacja metodą regresji liniowej	87
Rys. 75 Wizualizacja modelu wyjściowego i bryły domeny obliczeniowej Ansys SpaceClaim w wyniku operacji Volume Extract.....	88
Rys. 76 Wizualizacja drzewa geometrii modelu symulacyjnego geometrii docelowej oprogramowania Ansys SpaceClaim.....	89
Rys. 77 Wizualizacja funkcji pull dla geometrii dławienia modelu symulacyjnego geometrii docelowej oprogramowania Ansys SpaceClaim.....	89

Rys. 78 Parametr lokalnego wymiaru siatki Ansys Fluent, moduł Meshing	90
Rys. 79 Parametry użyte do przygotowania siatki modelu Ansys Fluent, moduł Meshing	90
Rys. 80 Parametr medium wody w Ansys Fluent, moduł Solution	91
Rys. 81 Parametr warunku brzegowego zadanego przepływu w Ansys Fluent, moduł Solution	92
Rys. 82 Kryteria konwergencji obliczenia symulacyjnego, Ansys Fluent, moduł Solution	92
Rys. 83 Przykładowy wykres zmiany obliczonych parametrów konwergencji w funkcji postępu iteracji symulacji, Ansys Fluent, moduł Solution	93
Rys. 84 Dane rozkładów statystycznych eksportu parametrów obliczonych komórek powierzchniowych domeny obliczeniowej żywicy (resin), program Minitab 17	94
Rys. 85 Schemat postępowania – analiza statystyczna wyników symulacyjnych w opisanym badaniu symulacyjnym – analiza rozkładu statystycznego wyników	95
Rys. 86 Wykres 3d estymowanego odchylenia standardowego prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów N = 20 w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s]	99
Rys. 87 Wykres 3d estymowanej średniej prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów N = 20 w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s].....	100
Rys. 88 Wykres 3d estymowanej wariancji prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów N = 20 w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s].....	100
Rys. 89 Wykres 3d ilorazu estymowanego odchylenia standardowego prędkości (velocity magnitude) do estymowanej średniej prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów N = 20 w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s]	101
Rys. 90 Wykres 3d ilorazu estymowanej wariancji prędkości (velocity magnitude) do estymowanej średniej prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów N = 20 w funkcji parametrów brzegowych przepływu oraz wymiaru dławienia, [m/s].....	102

9 Spis tabel

Tab. 1 Tabela wykresów pól rozkładu średnich stanów czujnika w funkcji zmiany przepływu dla różnych geometrii testowych	74
Tab. 2 Wyniki szczegółowe analizy niezależności wyników symulacji od zagęszczenia siatki (analiza MIS)	81
Tab. 3 Wyniki testu dopasowania rozkładów Andersona–Darlinga do puli próbek S:A [%]	85
Tab. 4 Tabela liczby iteracji potrzebnych do spełnienia zadanych warunków konwergencji symulacji geometrii docelowej	93
Tab. 5 Tabela histogramów wyników prędkości (velocity magnitude) dla symulowanego zakresu wariantów N = 20.....	96
Tab. 6 Tabela map kolorystycznych rozkładu prędkości (velocity magnitude) w przekroju centralnym dla symulowanego zakresu wariantów N = 20.....	97
Tab. 7 Tabela map kolorystycznych rozkładu ciśnienia (static pressure) w przekroju centralnym dla symulowanego zakresu wariantów N = 20.....	98
Tab. 8 Tabela wartości uśrednionych parametrów statystycznego rozproszenia dla geometrii obszaru dławienia w zakresie 1,2–1,6 mm	102